

Министерство науки и высшего образования РФ  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
Нижнетагильский технологический институт(филиал)УрФУ

# ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ

Материалы международной  
научно-технической конференции

Нижний Тагил  
18-19 июня 2020

УДК621 + 669.02/09  
ББК Ч21  
П81

*Ответственные редакторы:*

Миронова М. В., канд. техн. наук, доц.;  
Андреева Т. Н., ст. преподаватель кафедры ОМ

П81 **Промышленное производство и металлургия** : мат-лы международной науч.-техн. конф. (18–19 июня 2020 г.) ; Мин-во науки и высш. обр. РФ, УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2020. – 334 с.

ISBN 978-5-9544-0107-3

Сборник трудов научно-технической конференции включает научные статьи и тезисы ученых Российской Федерации, Казахстана, Белоруссии, Украины, а также специалистов промышленных предприятий. Материалы конференции посвящены вопросам развития теории и практики металлургии и машиностроения.

Материалы предназначены для научных работников, преподавателей, студентов, аспирантов и магистрантов высших учебных заведений, могут быть полезны широкому кругу лиц, интересующихся проблемами науки, образования и производства.

УДК621 + 669.02/09  
ББК Ч21

*Сборник составлен на основе материалов,  
предоставленных участниками конференции.  
Доклады опубликованы в соответствии с оригиналами,  
не подвергались научному и литературному редактированию.*

ISBN 978-5-9544-0107-3

© Авторы статей, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ.....</b>	<b>8</b>
<i>Бадртдинов М. А., Юдинцев Д. В.</i> К ВОПРОСУ РОБОТИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ОСНОВНОГО ТАНКА Т-90.....	9
<i>Бараковских Д. С., Шишкин С. Ф.</i> ЭЖЕКТОРНАЯ СТРУЙНАЯ МЕЛЬНИЦА С ВНЕШНИМ ДАВЛЕНИЕМ.....	14
<i>Бывальцев С. В.</i> ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ В ОБУЧЕНИИ ОПЕРАТОРОВ И ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА.....	20
<i>Волков М. А., Исаков Д. В., Гоман В. В.</i> ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА.....	25
<i>Долженкова Е. В., Юрьева Л. В.</i> РАЗРАБОТКА ИНДИКАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ХОЛДИНГА.....	31
<i>Кожемяко А. П., Костина Н. А., Вяткин А. А., Калугин Я. И., Камалов В. М., Банников Д. В.</i> СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПАО «УРАЛМАШЗАВОД» ДЛЯ ФАБРИК ОКУСКОВАНИЯ.....	36
<i>Кряжев Ю. А., Горин Е. Ю.</i> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ В ПРИКЛАДНОМ ПАКЕТЕ <i>RECURDYN</i> .....	44
<i>Либерман Я. Л., Лукинских С. В., Смирнов А. В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ТОКАРНОГО РЕЗЦА НА ОТВОД ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ.....	49
<i>Мугалимов Р. Г., Боков А. И., Мугалимова А. Р.</i> МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТУЧИХ НОЖНИЦ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО ТИПА.....	55
<i>Мугалимов Р. Г., Закирова Р. А., Мугалимова А. Р.</i> ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОВЫШЕНИЕМ ИХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОРЕМОНТНЫХ ЦЕХОВ И УЧАСТКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ.....	60
<i>Путилова Е. А., Шуталева А. В.</i> КОРПОРАТИВНАЯ КУЛЬТУРА КАК ОДИН ИЗ ГЛАВНЫХ ФАКТОРОВ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	63
<i>Соколов П. Б., Муравьева А. В.</i> ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ.....	66

<i>Соколов П. Б., Муравьева А. В.</i>	
МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВАЛКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА В ПАО «УРАЛМАШЗАВОД».....	73
<i>Спирidonов А. А., Саечников В. А., Ушаков Д. В., Кезик А. Г., Черный В. Е., Верстаковская А. П., Евчик В. Е.</i>	
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СЕТЬ СТАНЦИЙ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....	79
<i>Тарасов П. И., Егоров В. Б., Голубев О. В.</i>	
ГОРНЫЕ РАБОТЫ И КАРЬЕРНЫЙ ТРАНСПОРТ – ОСНОВА СТРОИТЕЛЬСТВА ТРАНСПОРТНЫХ КОРИДОРОВ.....	85
<i>Фирстов А. П.</i>	
ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕКОВЫХ СМЕСЕЙ.....	89
<i>Юрина Н. В., Блинков О. Г.</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИБЛИОТЕКИ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СЕРВЕРА АВТОРИЗАЦИИ.....	93
<b>МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....</b>	<b>99</b>
<i>Алимов В. И., Штыхно А. П.</i>	
ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ УПРОЧНЕНИЯ С ОТДЕЛЬНОГО И ПРОКАТНОГО НАГРЕВОВ СТАЛЬНЫХ ШАРОВ ДЛЯ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ.....	100
<i>Антипов В. И., Виноградов Л. В., Колмаков А. Г., Мухина Ю. Э., Банных И. О., Баранов Е. Е., Пруцков М. Е.</i>	
ВЫСОКОТВЕРДАЯ ВОЛЬФРАМО-МОЛИБДЕНО-КОБАЛЬТОВАЯ БЫСТРОРЕЖУЩАЯ СТАЛЬ ПОВЫШЕННОЙ ВЯЗКОСТИ.....	106
<i>Бабенко А. А., Смирнов Л. А., Уполовникова А. Г., Шартдинов Р. Р.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦЕРИЯ ИЗ ШЛАКОВ СИСТЕМЫ $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15\%Al}_2\text{O}_3\text{-8\%MgO}$ .....	109
<i>Бабенко А. А., Шартдинов Р. Р., Уполовникова А. Г., Сметанников А. Н., Михайлова Л. Ю.</i>	
ВЛИЯНИЕ ОСНОВНОСТИ И ОКСИДА ХРОМА НА ВЯЗКОСТЬ БОРСОДЕРЖАЩИХ ШЛАКОВ.....	114
<i>Бараковских Д. С., Шишкин С. Ф.</i>	
РАСЧЕТ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ДВУМЯ КЛАССИФИКАТОРАМИ.....	119
<i>Булатов К. В., Якорнов С. А., Ибрагимов А. Ф., Исхаков И. И.</i>	
ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ СУЛЬФИДНОГО МЕДНОГО КОНЦЕНТРАТА В ПАП НА КИСЛОРОДНОМ ДУТЬЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОННЫХ ФУРМ.....	125
<i>Витькина Г. Ю., Дмитриев А. Н., Алекторов Р. В.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ (АГЛОМЕРАТ И ОКАТЫШИ).....	132
<i>Ерпалов М. В.</i>	
РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ И ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ.....	138

<i>Журавлев А. А., Малыгин А. В.</i>	
МИНЕРАЛЬНАЯ СЫРЬЕВАЯ БАЗА (МСБ) МАРГАНЦА РОССИИ И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ.....	144
<i>Жучков В. И., Заякин О. В., Михайлова Л. Ю.</i>	
ПОЛУЧЕНИЕ НИОБИЙСОДЕРЖАЩИХ ФЕРРОСПЛАВОВ ИЗ РОССИЙСКОГО РУДНОГО СЫРЬЯ.....	148
<i>Жучков В. И., Заякин О. В., Леонтьев Л. И., Дашевский В. Я.</i>	
ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО РУДНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ФЕРРОСПЛАВОВ.....	153
<i>Звонцов Н. О., Рогожников Д. А.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВСКРЫТИЯ УПОРНЫХ АРСЕНОПИРИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ПРИ ПОМОЩИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЖИГА.....	159
<i>Земляной К. Г., Хафизова А. Р.</i>	
СИНТЕТИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ – ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	165
<i>Ильин К. В., Баранов Г. Л.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОСЫ НА КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И УСИЛИЕ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ.....	169
<i>Исагулов А. З., Квон С. С., Куликов В. Ю., Щербакова Е. П.</i>	
ПРИДАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 30ХЗМФ ЗА СЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ.....	175
<i>Климов А. В.</i>	
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ФОРМУ ПРИСУТСТВИЯ ВАНАДИЯ В ШЛАКАХ.....	181
<i>Климов А. В.</i>	
КИНЕТИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАНАДИЯ ИЗ ШЛАКОВ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫМ РАСПЛАВОМ.....	187
<i>Климов А. В.</i>	
КИНЕТИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАНАДИЯ ИЗ ШЛАКОВ ТВЕРДЫМ УГЛЕРОДОМ.....	193
<i>Королев С. А., Зимаков А. Е.</i>	
ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ СВАРНОГО ШВА НА ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ ВЕРОЯТНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН.....	198
<i>Коротков В. А., Исаков Д. В.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ КАРБОНИТРАЦИИ СТАЛИ 10.....	203
<i>Леонтьев Л. Б., Шапкин Н. П., Леонтьев А. Л., Тутов М. В., Шаршина Е. А.</i>	
КАРБОСИЛАН-СИЛОКСАНОВЫЕ ДЕНДРИМЕРЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ.....	210
<i>Лещенко С. Л.</i>	
ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ И КРАЙНЕГО СЕВЕРА.....	214

<i>Манин А. В., Илемкова Н. Р.</i>	
СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ.....	220
<i>Матюхин В. И., Матюхина А. В., Журавлев С. Я., Ямшанова Н. В.</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ.....	222
<i>Матюхин В. И., Матюхина А. В., Дудко В. А.</i>	
ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ СЛОЕВЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛОЕВОГО СПОСОБА СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА.....	229
<i>Михайлов С. Б., Шаранова В. А., Карелова А. Е., Михайлова Н. А.</i>	
РАСШИФРОВКА ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИНЦИПА ПЕРВОЙ ПРОИЗВОДНОЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НУЛЕВОЙ ЛИНИИ ДИЛАТОГРАММЫ.....	235
<i>Пантелеев В. В., Половец М. В.</i>	
ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ВАНАДИЯ В ЧУГУН.....	240
<i>Пасечник С. Ю., Пасечник А. Ю.</i>	
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК СТАЛЬ-МЕДЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ.....	244
<i>Рубцов В. Ю., Шевченко О. И.</i>	
РАЗРАБОТКА НОВЫХ КАЛИБРОВОК ШАРОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ С НЕПРЕРЫВНО-ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ.....	247
<i>Савельев М. В., Шешуков О. Ю., Егизарьян Д. К., Метелкин А. А., Шевченко О. И.</i>	
РАСЧЕТ УДАЛЕНИЯ СЕРЫ В АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ С ПОМОЩЬЮ ИОННОЙ ТЕОРИИ ШЛАКОВ.....	253
<i>Савельев М. В., Ткачев А. С., Шешуков О. Ю., Метелкин А. А., Шевченко О. И., Шмаков С. В.</i>	
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕРЫ ПО ПЕРЕДЕЛАМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА АО «ЕВРАЗ НТМК».....	259
<i>Сидорова К. В., Пыриков П. Г.</i>	
ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НОЖЕЙ ШРЕДЕРОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ «W–MoS <sub>2</sub> ».....	266
<i>Слепынина Т. Н.</i>	
РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЛИ НОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО?.....	269
<i>Соболева Н. Н., Макаров А. В., Николаева Е. П., Скорынина П. А., Малыгина И. Ю.</i>	
ВЛИЯНИЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ИНДЕНТОРОМ ИЗ DVN НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА NiCrBSi-Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> ПОКРЫТИЯ.....	273
<i>Сулеймен Б. Т., Салихов С. П.</i>	
МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ООЛИТОВОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ ПОСЛЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ОБЖИГА.....	279
<i>Табачков В. П., Кокорин В. Н., Морозов О. И., Корняков Е. Л.</i>	
ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ВЫТЯЖКИ МЕТОДАМИ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ.....	285

<i>Табакон В. П., Худобин Л. В., Чихранов А. В., Долженко Я. А.</i>	
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИТРИДА НИОБИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА.....	289
<i>Трекин Г. Е., Шевченко О. И.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ДУГОВЫМ АДДИТИВНЫМ ИЗГОТОВЛЕНИЕМ ПОД РАЗЛИЧНЫМИ ФЛЮСАМИ.....	293
<i>Трекин Г. Е., Шевченко О. И.</i>	
РАЗРУШЕНИЕ ЭЛЕКТРО-ИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ НАГРЕВЕ ПОДЛОЖКИ ПРОХОДЯЩИМ ТОКОМ.....	301
<i>Хазин М. Л., Апакашев Р. А., Тарасов П. И.</i>	
НАПРАВЛЕНИЯ ЛИКВИДАЦИИ ОТВАЛОВ ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ.....	307
<i>Шевченко О. И., Рубцов В. Ю., Спирина А. С., Панькова Н. А.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ШАРОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ .....	310
<i>Шевченко О. И., Трекин Г. Е.</i>	
ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ...	316
<i>Шишкин А. С., Шишкин С. Ф.</i>	
ПРОТИВОТОЧНЫЙ СТУПЕНЧАТЫЙ ХОЛОДИЛЬНИК СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА.....	321
<i>Шешуков О. Ю., Михеенков М. А., Некрасов И. В., Егизарьян Д. К.</i>	
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СУЛЬФАТНЫХ ФОРМ ЦИНКА ИЗ ШЛАМОВ АО «ЕВРАЗ НТМК» И ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОФЛЮСА ПОСЛЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦИНКА ИЗ ШЛАМОВ.....	327
<i>Шешуков О. Ю., Михеенков М. А., Некрасов И. В., Егизарьян Д. К., Ведмидь Л. Б.</i>	
СНИЖЕНИЕ ОПАСНОСТИ КАРБО-НИТРИДО-ОБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА ТИТАНА В ШИХТЕ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ АО «ЕВРАЗ НТМК».....	330

# **Машиностроение**



**К ВОПРОСУ РОБОТИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ДВИЖЕНИЕМ ОСНОВНОГО ТАНКА Т-90**

**Бадртдинов Мирхат Ахметзияевич,**

E-Mail: [mirxat@mail.ru](mailto:mirxat@mail.ru),

АО «Уральское конструкторское бюро транспортного машиностроения»,

**Юдинцев Дмитрий Владимирович,**

E-Mail: [yudin\\_dv@mail.ru](mailto:yudin_dv@mail.ru),

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

## ЭЖЕКТОРНАЯ СТРУЙНАЯ МЕЛЬНИЦА С ВНЕШНИМ ДАВЛЕНИЕМ

**Бараковских Дмитрий Сергеевич,**

E-Mail: [d.s.barakovskikh@urfu.ru](mailto:d.s.barakovskikh@urfu.ru),

Уральский федеральный университет,  
Институт новых материалов и технологий,

**Шишкин Сергей Федорович,**

E-Mail: [shsf@planet-a.ru](mailto:shsf@planet-a.ru),

Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Струйные мельницы применяются для получения тонкодисперсных продуктов во многих отраслях промышленности. Обладая большим рядом достоинств, струйные мельницы представляют как научный, так и практический интерес. Широкое распространение получили спиральные струйные мельницы и струйные мельницы кипящего слоя, где разрушение частиц происходит в результате процесса истирания. Использование ударных эжекторных струйных мельниц ограничено относительно низкой расходной концентрацией материала. При увеличении расходной концентрации материала уменьшается скорость разгона частиц и степень измельчения материала. Для устранения данного недостатка разработан новый способ и конструкция эжекторной струйной мельницы для тонкого измельчения сыпучих материалов (патент РФ № 2711252). Технологический процесс происходит при избыточном внешнем давлении эжектируемого газа. Показано, что при отношении давлений рабочего и вторичного газа выше критического, удастся повысить давление в начале разгонной трубки. Благодаря этому, увеличивается расходная концентрация сыпучего материала и скорость разгона измельчаемых частиц. Это позволяет уменьшить удельные затраты энергии и увеличить степень измельчения. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили увеличение расходной концентрации в 1.6–1.9 раза и повышение степени измельчения в 1.3–1.7 раза по сравнению с типовой эжекторной струйной мельницей.

**Ключевые слова.** Струйная мельница, эжектор, разгонная трубка, измельчение, дисперсный материал, степень измельчения, расходная концентрация.

Струйный помол является перспективным способом получения тонкодисперсных материалов и применяется во многих отраслях промышленности, где важную роль занимает качество готового продукта. Известно, что струйные мельницы обеспечивают сравнительно высокую, по химическому составу, чистоту готового продукта. Данный вид оборудования использует энергию сжатого газа для разгона и измельчения частиц. Измельчение происходит в малом объеме с высокой концентрацией энергии, что является преимуществом для механической активации материалов. Обладая большим рядом достоинств, струйные мельницы представляют как научный, так и практический интерес в вопросах интенсификации процесса измельчения [1–3]. Широкое распространение получили спиральные струйные мельницы и струйные мельницы кипящего слоя, где основным процессом разрушения частиц является истирание. Последние исследования струйных мельниц кипящего слоя, в основном, направлены на моделирование двухфазных потоков при измельчении в псевдооживленном слое, а также на процесс классификации, т. к. этот процесс влияет на производительность и качество готового продукта [4, 5]. Исследования спиральных мельниц, в основном, направлены на моделирование движения частиц в камере помола и прогнозирование измельчения материала [6, 7]. Использование ударных эжекторных струйных мельниц и противоточных струйных мельниц не получило широкого распространения из-за абразивного износа и ограниченной концентрации материала. В противоточных струйных мельницах вероятность столкновения частиц в струях с малой концентрацией очень низкая [2]. В работах [8, 9] представлены

исследования по оптимизации сопла и разгонной трубки с целью увеличения скорости частиц, при относительно низкой расходной концентрации твердых частиц для данного типа мельниц.

Цель данной работы увеличить расходную концентрацию измельчаемого материала и скорость частиц в эжекторной струйной мельнице.

Измельчение материала в струйных мельницах происходит в результате удара частиц о преграду или за счет столкновения двух встречных потоков частиц. Степень измельчения материала, определяется скоростью разгона частиц, а удельные затраты энергии зависят от расходной концентрации материала, которая определяется отношением [10]:

$$\mu = \frac{G_m}{G_g}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – расходная концентрация материала кг/кг;  $G_m$  – производительность по материалу, кг/с;  $G_g$  – массовый расход газа, кг/с.

Известно, что увеличение концентрации материала позволяет повысить производительность и снизить удельные затраты энергии [11]. Увеличить скорость разгона и расходную концентрацию возможно повышением давления в начале разгонной трубки. Из газовой динамики [12] известно, что максимальное давление в конце камеры смешения, в начале разгонной трубки определяется зависимостью

$$P_3 = \frac{\alpha P_1 + P_2}{\alpha + 1}, \quad (2)$$

где  $P_3$  – полное давление в начале разгонной трубки;  $\alpha$  – основной геометрический параметр эжектора, равный отношению площадей выходных сечений сопел для эжектирующего и эжектируемого газов;  $P_1$  – полное давление перед соплом эжектирующего газа;  $P_2$  – внешнее давление эжектируемого газа.

Для эжекторных струйных мельниц начальный участок разгонной трубки является камерой смешения, поэтому основной геометрический параметр эжектора находится из уравнения

$$\alpha = \frac{F_1}{F_3 - F_1} = \frac{d_1^2}{D_3^2 - d_1^2} = \left( \left( \frac{D_3}{d_1} \right)^2 - 1 \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $F_1$  – площади сечения сопла, м<sup>2</sup>;  $F_3$  – площади сечения разгонной трубки, м<sup>2</sup>;  $d_1$  – диаметр критического сечения сопла, м;  $D_3$  – диаметр разгонной трубки, м.

В типовых эжекторных струйных мельницах давление эжектируемого газа  $P_2$  равно атмосферному давлению  $P_a$ . Поэтому в соответствии с формулой (2) давление  $P_3$  в начале разгонной трубки ограничено и, обычно, не превышает 2,5 атм. Его увеличение за счет увеличения  $\alpha$  и  $P_1$  невозможно вследствие запираания эжектора [13]. Схема типовой эжекторной струйной мельницы с графиком изменения полного давления  $P$  по длине разгонной трубки  $L_m$  представлена на рис. 1.

Для повышения давления в начале разгонной трубки  $P_3$ , разработан способ (патент РФ 2711252), при котором эжектирование осуществляется при внешнем давлении эжектируемого газа выше атмосферного давления  $P_2 > P_a$ . При этом, отношение давлений перед соплом и снаружи сопла  $P_1/P_2$  должно быть больше критического, для обеспечения сверхзвуковой скорости газа на выходе из сопла, т. е. должно выполняться условие [12]

$$\Pi = \frac{P_1}{P_2} > \frac{P_1}{P_k} = \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \approx 1.893, \quad (4)$$

где  $\Pi$  – отношение давлений;  $P_k$  – критическое давление газа перед соплом;  $k$  – коэффициент адиабаты (для воздуха  $k = 1,4$ ).

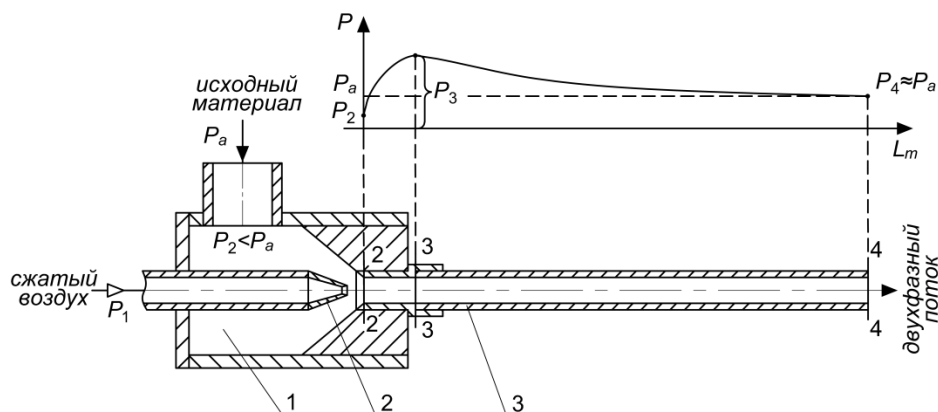


Рис. 1 Типовая эжекторная струйная мельница с графиком полного давления по длине разгонной трубки  
 1 – камера эжектора; 2 – сверхзвуковое сопло; 3 – разгонная трубка; 2–2 – начало разгонной трубки (начало смешения потоков в разгонной трубке); 3–3 – конец смешения потоков (начало разгона двухфазного потока); 4–4 – конец разгонной трубки

На рис. 2 представлена схема эжекторной струйной мельницы с внешним давлением и графиком изменения полного давления  $P$  по длине разгонной трубки  $L_m$ . В табл. 1 приведены расчеты давлений  $P_3$  и  $P'_3$  в начале разгонной трубки для типовой эжекторной струйной мельницы и эжекторной струйной мельницы с внешним давлением.

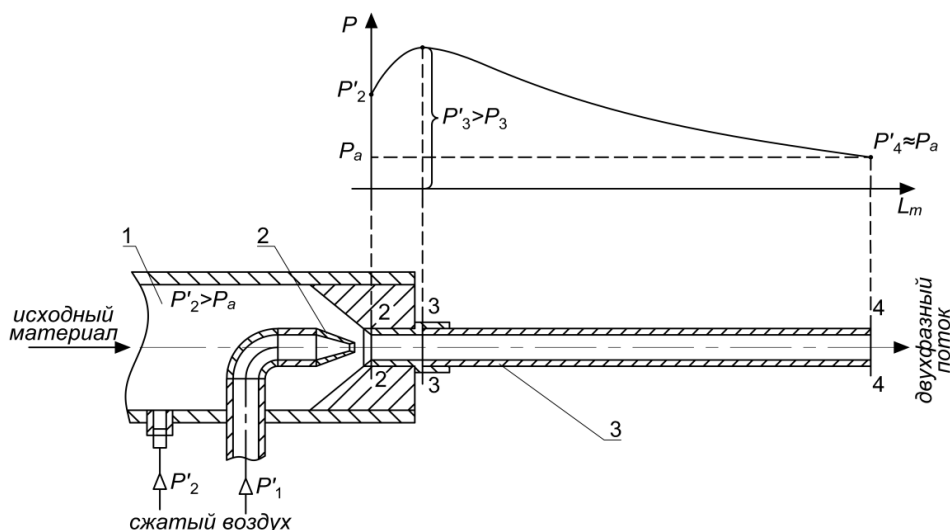


Рис. 2 Эжекторная мельница с внешним давлением и графиком полного давления по длине разгонной трубки:  
 1 – камера эжектора; 2 – сверхзвуковое сопло; 3 – разгонная трубка; 2–2 – начало разгонной трубки (начало смешения потоков в разгонной трубке); 3–3 – конец смешения потоков (начало разгона двухфазного потока); 4–4 – конец разгонной трубки

Таблица 1  
 Зависимость давления в начале разгонной трубки для типового эжектора  $P_3$  и эжектора с внешним давлением  $P'_3$  при  $P_1 = 7$  атм.

$D_3/d_1$	$\alpha$	$P_3$ , атм	$P'_3$ , атм
2,0	0,333	2,5	4,38
2,5	0,190	1,96	4,06
3,0	0,125	1,67	3,89

Из представленных данных следует, что при одинаковом давлении  $P_1$  рабочего газа перед соплом, в новой мельнице давление в начале разгонной трубки  $P'_3$  почти в 2 раза больше, чем в типовой струйной мельнице [10].

Для реализации рассмотренного способа, разработана установка эжекторной струйной мельницы с внешним давлением (патент РФ 2711252). Схема установки представлена на рис. 3.

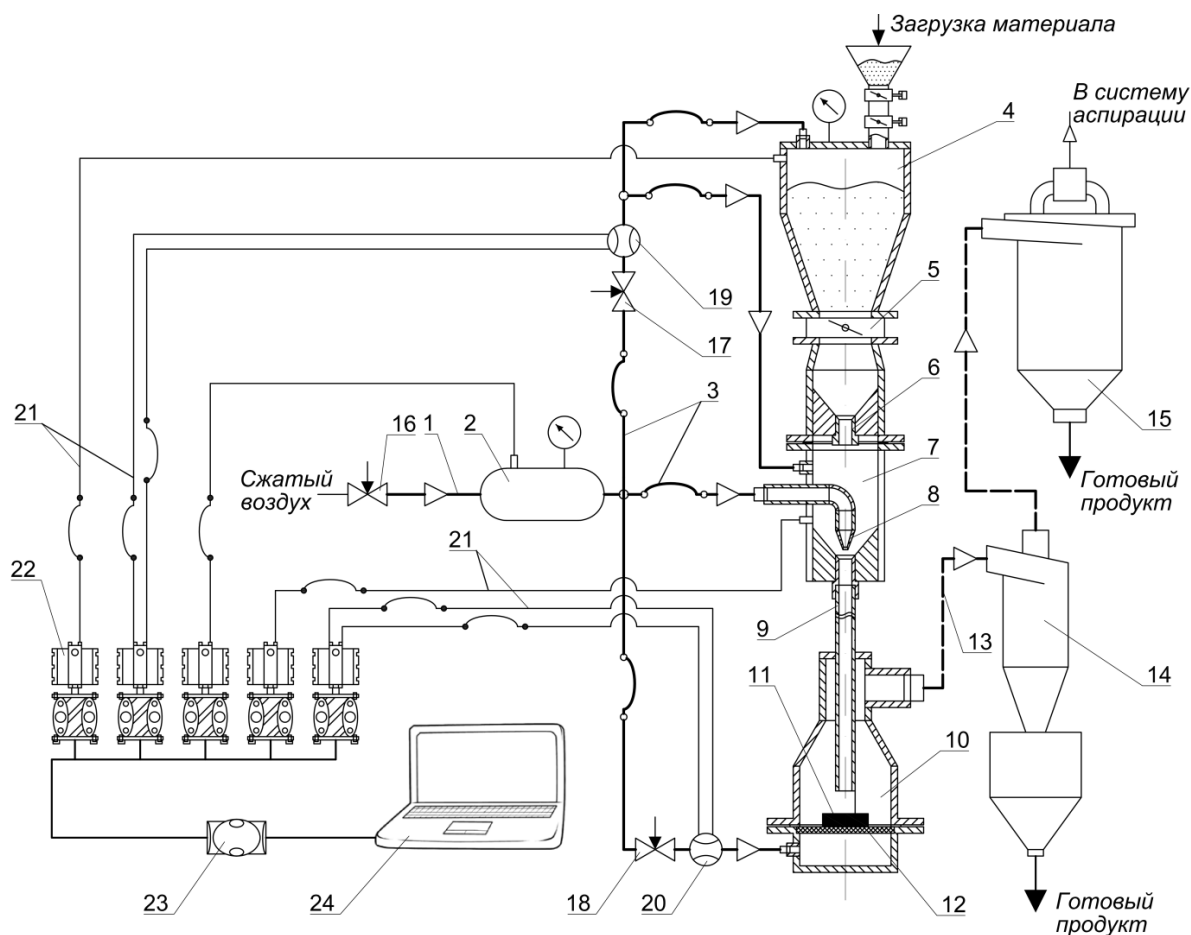


Рис. 3 Схема установки эжекторной струйной мельницы с внешним давлением:

- 1 – патрубок для подвода сжатого воздуха; 2 – ресивер; 3 – трубопроводы сжатого воздуха; 4 – бункер с материалом; 5 – затвор поворотный; 6 – вставка с калиброванным отверстием; 7 – камера эжектора; 8 – сверхзвуковое сопло; 9 – разгонная трубка; 10 – камера помола; 11 – преграда; 12 – аэрирующая решетка; 13 – трубы; 14 – циклон; 15 – рукавный фильтр; 16, 17, 18 – шаровой кран; 19, 20 – стандартная диафрагма; 21 – импульсные трубки; 22 – микропроцессорные датчики «Метран-100 ДИ», «Метран-100 ДД»; 23 – контроллер; 24 – ПЭВМ

Струйная мельница с внешним давлением работает следующим образом. Сжатый воздух по трубопроводу 1 подводится к ресиверу 2, где с помощью вентиля 16 поддерживается полное давление рабочего газа  $P_1$ . По трубопроводам 3 сжатый воздух подается к соплу 8, в бункер 4, камеру эжектора 7 и под аэрирующую решетку 12. С помощью крана 17 и стандартной диафрагмы 19 устанавливается необходимый расход эжектируемого воздуха  $G_2$ , в бункере 4 и камере эжектора 7 создается внешнее давление  $P_2$ . С помощью крана 18 и стандартной диафрагмы 20 устанавливается необходимый расход воздуха  $G_3$  аэрации материала в камере помола 10. Затем открывается поворотный затвор 5 и через калиброванное отверстие 6, измельчаемый материал поступает через камеру эжектора в разгонную трубку 9, где происходит разгон материала. После удара

о преграду 11 измельченный материал по трубе 13 выносится в циклон 14. Санитарная очистка воздуха осуществляется в рукавном фильтре 15. Рабочее давление  $P_1$  и внешнее давление  $P_2$ , а также перепады давления фиксируются через импульсные трубки 21 микропроцессорными датчиками давления 22. Данные через контроллер 23 записываются в реальном времени на ПЭВМ 24. Расход газа  $G_1$  вычисляется по стандартной методике [14, 15].

Были проведены сравнительные испытания мельницы (СМВД) новой конструкции и типовой эжекторной мельницы (СМ). Для помола использовалось два материала: кварцевый песок с плотностью  $\rho_t = 2700 \text{ кг/м}^3$ , насыпной плотностью  $\rho_n = 1965 \text{ кг/м}^3$ , средним размером частиц  $d_{50} = 280 \text{ мкм}$  и полевой шпат с плотностью  $\rho_t = 2630 \text{ кг/м}^3$ , насыпной плотностью  $\rho_n = 1590 \text{ кг/м}^3$ , средним размером частиц  $d_{50} = 180 \text{ мкм}$ .

Гранулометрические составы материалов после одного цикла измельчения приведены в табл. 2. Как следует из представленных данных, степень измельчения в результате одного удара для мельницы с внешним давлением выше. Так для кварцевого песка средний размер частиц и степень измельчения на СМ:  $d_{50} = 126.96 \text{ мкм}$ ,  $i = 2.21$ ; на СМВД:  $d_{50} = 74.99 \text{ мкм}$ ,  $i = 3.73$ . Для полевого шпата на СМ:  $d_{50} = 73.60 \text{ мкм}$ ,  $i = 2.45$ ; на СМВД:  $d_{50} = 55.31 \text{ мкм}$ ,  $i = 3.25$ . Таким образом, использование эжекторной струйной мельницы с внешним давлением позволило увеличить степень измельчения кварцевого песка в 1.7 раза и полевого шпата в 1.3 раза по сравнению с типовой эжекторной струйной мельницей.

Таблица 2  
Гранулометрические составы продуктов измельчения на струйной мельнице с внешним давлением (СМВД) и типовой эжекторной струйной мельнице (СМ)

Сита	Кв. песок (СМ)			Кв. песок (СМВД)			Полевой шпат (СМ)			Полевой шпат (СМВД)		
	R,%	D,%	r,%	R,%	D,%	r,%	R,%	D,%	r,%	R,%	D,%	r,%
630	1.11	98.89	1.11	0.10	99.90	0.10	0.00	100.0	0.00	0.00	100.0	0.00
400	5.97	94.03	4.85	1.42	98.58	1.32	2.10	97.90	2.10	0.51	99.49	0.51
315	10.11	89.89	4.15	2.84	97.16	1.42	4.61	95.39	2.51	1.62	98.38	1.11
200	27.91	72.09	17.80	12.07	87.93	9.23	15.03	84.97	10.42	9.63	90.37	8.00
160	39.94	60.06	12.03	19.88	80.12	7.81	22.75	77.25	7.72	15.60	84.40	5.98
100	61.88	38.12	21.94	40.06	59.94	20.18	39.58	60.42	16.83	30.19	69.81	14.59
63	74.12	25.88	12.23	55.17	44.83	15.11	53.51	46.49	13.93	43.57	56.43	13.37
40	84.73	15.27	10.62	71.1	28.90	15.92	69.64	30.36	16.13	61.30	38.70	17.73
0	100.0	0.00	15.27	100.0	0.00	28.90	100.0	0.00	30.36	100.0	0.00	38.70

Режимные параметры мельниц для одного цикла измельчения кварцевого песка и полевого шпата приведены в табл. 3.

Таблица 3  
Режимные параметры мельниц СМ и СМВД для одного цикла измельчения

Материал	$m$ , кг	$t$ , с	$Gm$ , кг/с	$P_1$ , МПа	$P_2$ , МПа	$G_1$ , кг/с	$G_2$ , кг/с	$\mu$ , кг/кг
Кв. песок (СМ)	1.000	32	0.0312	0.5084	–	0.0283	–	1.104
Кв. песок (СМВД)	2.000	43	0.0465	0.5804	0.2328	0.0183	0.0076	1.796
Полевой шпат (СМ)	0.800	30	0.0267	0.5017	–	0.0280	–	0.952
Полевой шпат (СМВД)	2.000	45	0.0444	0.5621	0.2357	0.0178	0.0073	1.771

Из представленных данных следует, что расходная концентрация  $\mu$  в эжекторной струйной мельнице с внешним давлением в 1.6 раза больше при помоле кварцевого песка, и в 1.9 раза больше при помоле полевого шпата по сравнению с типовой эжекторной струйной мельницей.

Также были проведены эксперименты, при которых была увеличена расходная концентрация в эжекторной струйной мельнице с внешним давлением по сравнению с типовой эжекторной струйной мельницей в 3.0 раза при измельчении кварцевого песка и в 4.0 раза при измельчении полевого шпата, при этом получились достаточно близкие степени измельчения материала у данных мельниц.

#### Библиографический список

1. Федотов, К. В. Струйное измельчение / К. В. Федотов, В. И. Дмитриев. – Москва : Горная книга, 2014. – 194 с.
2. Chamayou, A. Air jet milling / A. Chamayou, J. A. Dodds // Handbook of Powder Technology vol. 12. – Amsterdam, 2007. – Ch. 8. – P. 437–486.
3. Постникова, И. В. Струйные мельницы / И. В. Постникова, В. Н. Билинчев, Я. Кравчик // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2015. – № 2 (42). – С. 144–151.
4. Benz, M Performance of a fluidized bed jet mill as a function of operating parameters / M. Benz, H. Herold, B. Ulfik // International Journal of Mineral Processing. – 1996. – Vol. 44–45. – P. 507–519.
5. Dynamics of fine grinding in a fluidized bed opposed jet mill / B. Koeninger, T. Hensle, S. Romeis [ect.] // Powder Technology. – 2018. – Vol. 327. – P. 346–357.
6. DEM–CFD simulation of particle comminution in jet-mill // T. Brosh, H. Kalmana, A. Levy [ect.] // Powder Technology. – 2014. – Vol. 257. – P. 104–112.
7. Modeling of continuous self-classifying spiral jet mills part1: Model structure and validation using mill experiments / D. Starkey, C. Taylor, N. Morgan [ect.] // AIChE Journal. – 2014. – Vol. 60 (12). – P. 4086–4095.
8. Voropayev, S. Designing a jet mill nozzle of maximum efficiency / S. Voropayev, D. Eskin // Chemical Engineering and Technology. – 2002. – Vol. 15 (6). – P. 1101–1106.
9. Voropayev, S. Optimal particle acceleration in a jet mill nozzle / S. Voropayev, D. Eskin // Minerals Engineering. – 2002. – Vol. 25 (11). – P. 447–449.
10. Пат. 2711252 Российская Федерация, МПК В02С19/06. Способ и устройство измельчения сыпучих материалов : № 2018138365 : заявл. 31.10.18 : опубл. 15.01.2020 / Бараковских Д. С., Шишкин С. Ф.; заявитель и патентообладатель УрФУ. – 5 с. – Бюл. № 2.
11. Витушкин, В. В. Исследование разгона частиц твердого материала в пневмоструйных измельчителях / В. В. Витушкин, Г. К. Каретников, В. М. Овчинников [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение. – 2004. – № 4. – С. 43–56.
12. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – Москва : Наука, 1991. – 600 с.
13. Прикладная газодинамика / Б. И. Каторгин, А. С. Киселев, Л. Е. Стернин, В. К. Чванов. – Москва : Вузовская книга, 2009. – 340 с.
14. Пирумов, У. Г. Газовая динамика сопел / У. Г. Пирумов, Г. С. Росляк. – Москва : Наука, 1990. – 368 с.
15. Daniel, T. H. New / Vortex rings and jets / Daniel T. H. New, Simon C. M. Yu. – Singapore : Springer, 2015. – 235 с.

## ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ В ОБУЧЕНИИ ОПЕРАТОРОВ И ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА

**Бывальцев Сергей Васильевич,**

E-mail: [s\\_ikar@mail.ru](mailto:s_ikar@mail.ru),

Уральский федеральный университет,  
Институт Машиноведения УрО РАН,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Предлагается использование технологии дополненной реальности для увеличения эффективности обучения операторов и обслуживающего персонала в промышленности. При рассмотрении вопросов построения систем дополненной реальности замечено, что кроме технологических вопросов необходимо уделять повышенное внимание и социальному аспекту, особенно если предполагается применять технологию дополненной реальности в многопользовательском режиме. Общая среда при взаимодействии нескольких участников может нарушать чувство идентичности пользователей, а также потенциально угрожать чувству личного пространства и ощущению физических объектов. Необходимо учитывать когнитивную теорию нагрузки и теоретическую модель затухания конкретности.

**Ключевые слова.** Дополненная реальность, обучение персонала, обучение операторов, когнитивная теория, *AR, augmented reality*.

### **Введение**

Дополненная реальность с каждым годом все больше проникает в промышленность и образование. Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации была разработана Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Технологии виртуальной и дополненной реальности» [1].

Смешивание физических и цифровых миров определяет сочетание реальной и виртуальной сред и является частью континуума реальности-виртуальности (*RVC*) [2], [3]. *RVC* описывает взаимодействия между реальностью и виртуальностью. В *RVC* дополненная реальность (*AR*) – это отображение виртуальных объектов в контексте реального мира. Современные *AR*-решения на портативных устройствах используют изображение с реального устройства и объединяют его с виртуальным контентом. Подобные решения уже давно выпускаются серийно в виде монтируемых на голове устройств, например, *Microsoft HoloLens 2* [4], *Google Glass Enterprise Edition 2* [5], *Meta 2* [6]. Современные приложения *AR* также включают тактильную обратную связь и пространственный звук [7, 8].

### **Особенности применения AR в обучении**

Применение *AR* для повышения эффективности операторов и обслуживающего персонала является несомненным преимуществом, однако необходима разработка специальных программных продуктов с поддержкой *AR* и обучение пользователей применению этой технологии. Причем следует дозировать количество информации, подаваемой через *AR*, т. к. у операторов может развиваться привыкание к подсказкам системы и снизится желание самостоятельно решать проблемы и даже невозможность выполнить те же действия без применения *AR*. Для этого предлагается при обучении пользователей постепенно уменьшать поток новой информации, т. к. возможно, что будет пропущена действительно важная. Дополнительно необходимо убирать незначительную или неактуальную для выполняемого процесса информацию.

Следует учитывать, что у людей ограничена емкость рабочей памяти [9, 10]. При этом в процессе обучения накладывается три типа когнитивной нагрузки: 1) внутренняя когнитивная нагрузка, определяемая сложностью самой задачи обучения; 2) посторонняя когнитивная нагрузка, связанная с сознательными, конструктивными процессами,



используемыми для конструирования ментальных представлений и не способствующих обучению; 3) уместная когнитивная нагрузка. Если рабочая емкость памяти полностью задействована в процессах, связанных с внутренней и посторонней нагрузкой, то для обучения не будет оставшихся когнитивных ресурсов и процесс обучения будет затруднен. В соответствии с моделью обучения [11] ранние задачи обучения должны включать более низкую внутреннюю когнитивную нагрузку от интерактивности элементов, а по мере того, как задачи становятся более сложными, должна снижаться посторонняя нагрузка при переходе к более сложному материалу.

По теоретической модели затухания конкретности [12] процесс обучения операторов эффективно проводить в три стадии. На первой стадии производится обучение на конкретных примерах, когда оператору проще интерпретировать неоднозначные абстрактные представления в терминах хорошо понятных конкретных объектов, а также используются преимущества воплощенного познания, дающего опыт работы с физическими и перцептивными процессами, которые ограничены и дают правильные выводы. По воплощенной теории познания [13, 14], когнитивные процессы высокого уровня происходят из действия и восприятия. На этой стадии понимание абстрактных символов требует отображения этих символов на телесные переживания или представления этих переживаний. Дополнительно, оператор запоминает набор изображений, символов и жестов, которые будут использоваться в метафоре AR, когда абстрактные символы соотносятся с реальными объектами. После усвоения абстрактной концепции при решении новых проблем оператор будет полагаться на этот запас атрибутов [15]. На остальных двух этапах происходит переход от реального физического представления к графическим схемам и моделям, а затем к обычным абстрактным символам.

Данный момент требует дальнейшего исследования, т. к. согласно [16] переход от абстрактного к конкретному иногда может повышать эффективность обучения.

Таким образом, при обучении операторов программное обеспечение AR должно адаптироваться к накопленному опыту оператора. Соответственно производится переход от указания последовательности всех необходимых шагов для выполнения конкретной операции к контролю правильности действий и фиксации самого факта исполнения заложенных инструкций.

### **Социальный и технические аспекты применения AR**

При построении AR наиболее часто исследуются чисто технические аспекты проектирования среды AR. Лишь в последнее время стало отмечаться, что необходимо учитывать социальный аспект применения AR. У пользователей AR развивается чувство взаимосвязанности и психологической принадлежности к виртуальным артефактам в среде AR больше, чем в обычной виртуальной среде. Общая среда при взаимодействии нескольких участников может нарушать чувство идентичности пользователей, а также потенциально угрожать чувству личного пространства и ощущению физических объектов [17, 18]. Причем существует определенная разница в оценке восприятия при использовании очков дополненной реальности и носимого в руке устройства [19]. Для передачи в систему AR обратной связи возможно использовать установленные на теле датчики. Однако некоторые действия проще выполнять на улице, чем в общественном месте, т. к. некоторые жесты там просто недопустимы [20]. Также необходимо учитывать, что какие-то жесты и движения оператора могут быть связаны не с процессом управления системой AR, а с выполнением какой-либо другой работы, обслуживанием установки или случайными движениями.

Также при использовании AR возможно ощущение физиологического дискомфорта при нарушении личного пространства [21].

Кроме того, для повышения эффективности обучения необходимо повышать уровень доверия оператора к системе AR [22] и визуализировать процессы с применением привычной для оператора внешней среды, особенно при удаленном управлении.

Как уже было отмечено, в процессе обучения навыкам работы с AR необходимо двигаться от виртуального окружения к реальному миру, когда оператору дается только необходимая дозированная информация и производится контроль и проверка правильности его действий. Предлагается использовать многоуровневые сценарии отображения данных в зависимости от квалификации и типа персонала. Например, отображение только текущей температуры, его график в ближайшее время, его экстраполяция на будущее, или только сообщение при отклонении от ожидаемого значения и т. п.

Аналогично, для представления данных необходимо двигаться от реального физического представления к их абстрактному отображению.

В настоящее время широко применяется AR непосредственно для самого процесса обучения [23, 24]. На наш взгляд эффективнее применять AR для больших и сложных систем, в которых необходимо обеспечивать надежность и стабильность через абстрактное представление данных оператору в реальном времени, наложенных на естественную окружающую среду [25].

Для анализа внешнего окружения проще всего использовать систему компьютерного зрения [26]. Для привязки физическим объектам предлагается использование безмаркерной технологии, которая не предполагает использование федуциальных маркеров [27] или естественных маркеров на оборудовании [28, 29]. При этом существует проблема адаптации системы компьютерного зрения к изменению внешнего освещения [30]. Чаще всего изображение оборудования через откалиброванную камеру обрабатывается фреймворком *ARToolKit* [31], либо *SLAM* [32], которые можно заменить на более усовершенствованный *GLEAM* [33]. Отметим, что необходимо стремиться устранять проблему восприятия глубины графических объектов, накладываемых на реальный мир [34, 35]. Это особенно проявляется в стереоскопических системах, в которых необходимо обеспечивать «просвечивающее зрение». Для носимых в руке устройств такая проблема является менее актуальной [36].

Наибольшего эффекта от применения AR можно достичь при обеспечении совместной деятельности и проведении работ, которые требуют скоординированного труда. В таком случае, для многопользовательского AR особенно актуальным становится рассмотренный ранее социальный аспект, а также безопасность и защита от постороннего вмешательства [37, 38].

Дополнительным преимуществом применения AR является повторное применение программного обеспечения для обучения. При смене обслуживающего персонала и пользователей системы нет необходимости в обучении их всем знаниям и навыкам сразу. Они получают их непосредственно от системы AR в процессе применения. Требования к уровню квалификации пользователей при этом значительно снижаются, но повышаются требования к обслуживающей AR системе (ПО, базы данных и знаний, наполненность правил и моделей). Также снижаются человеческие ошибки, и появляется возможность контроля действий оператора в режиме реального времени [39].

#### **Направление дальнейших исследований**

Определенные проблемы может представлять возможность работы AR без доступа к сети, в офлайн-режиме, но проектировщики AR для промышленности предлагают использование сеансов связи и специальных запросов [40].

Несмотря на сложности с внедрением AR в промышленности передовые производители средств автоматизации уже предлагают готовые решения [41, 42].

На наш взгляд AR необходимо применять для сложных систем, в которых необходимо исключать человеческие ошибки [43, 44].

Отметим, что AR все больше используется не только для обучения персонала, но и для управления промышленными системами [45, 46] и установками [47, 48].

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры Информационных технологий и автоматизации проектирования Уральского федерального университета и коллективу лаборатории Системного моделирования Института машиноведения УрО РАН, без ценных советов и критических замечаний которых было бы невозможно опубликовать данное исследование.

#### Библиографический список

1. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «технологии виртуальной и дополненной реальности» Available at: <https://digital.gov.ru/ru/documents/6654/> (accessed 04.03.2020).
2. Milgram P and Kishino F 1994 *IEICE Trans. Inf & Syst.* Vol. E77-D No. 12 1322-9.
3. Milgram P, Takemura H, Utsumi A and Kishino F 1994 *SPIE, Telemanipulator and Telepresence Technologies* Vol. 2351 282-92.
4. *Website of Microsoft HoloLens 2* Available at: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/> (accessed 04.03.2020).
5. *Technical specifications of Google Glass Enterprise Edition 2* Available at: <https://www.google.ru/glass/tech-specs/> (accessed 04.03.2020).
6. *The Meta 2 Development Kit* Available at: <https://www.schenker-tech.de/en/meta-2/> (accessed 04.03.2020).
7. Goose S, Sudarsky S, Zhang X, and Navab N 2003 *IEEE Pervasive Computing* Vol 2 Issue 1 65–70.
8. Radu I and Schneider B 2019 Proc. of the 2019 CHI Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI '19) (New York: ACM) pp 544:1-544:12.
9. Sweller J, Merrienboer J J G and Paas F W C 1998 *Educational Psychology Review* 10 251–96.
10. Baddeley A D 1983 *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* Vol 302 1110 311–24.
11. Merrienboer J J G and Sluijsmans D M A 2009 *Educational Psychology Review* 21(1) 55–66.
12. Fyfe E R, Neil N M, Son J Y and Goldstone R L 2014 *Educational Psychology Review* 26(1) 9–25.
13. Barsalou L W 2003 *Language & Cognitive Processes* 18 513–62.
14. Lakoff G and Nunez R E 2000 *Where mathematics comes from: how the embodied mind brings mathematics into being* (New York: Basic Books) p 493.
15. Bruner J S 1966 *Toward a theory of instruction* (Cambridge: Belknap) p 192.
16. Johnson A M, Reisslein J and Reisslein M 2014 *Computers & Education* 72 249–61.
17. Poretski L, Lanir J, Arazy O and Oded N 2019 *Proc. of the 1st Workshop on Challenges Using Head-Mounted Displays in Shared and Social Spaces CHI'19 Extended Abstracts* (Glasgow, Scotland UK) p 6.
18. Poretski L, Lanir J and Arazy O 2018 *Proc. of the ACM on Human-Computer Interaction (PACMHCI)* Vol 2 Issue CSCW (New York, USA) pp 142:1–24.
19. Koelle M, Kranz M and Möller A 2015 Proc. of the 17th Int. Conf. on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services MobileHCI '15 362–72.
20. Williamson J R, Crossan A and Brewster S 2011 *Proc. of the 13th Int. Conf. on Multimodal Interfaces ICMI '11* 361–8.
21. Wilcox L M, Allison R S, Elfassy S and Grelik C 2006 *ACM Transactions on Applied Perception* Vol 3 Issue 4 412–28.
22. Haesler S, Kim K, Bruder G and Welch G 2018 *IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)* pp 204–5.
23. Manoela S, Teichrieb V and Smith P 2019 *Anais dos Workshops do VIII Congresso Brasileiro de Informática na Educação (WCBIE 2019)* pp 1452–6.

24. Fite-Georgel P 2011 10th IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) (Basel Switzerland) pp 201–10.
25. Masood T and Egger J 2019 *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Vol 58 181–95.
26. OpenCV for Processing, by Greg Borenstein. A Processing library for the OpenCV computer vision library Available at: <https://github.com/atduskgreg/opencv-processing> (accessed 04.03.2020).
27. Fiala M 2005 Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Vol 2 590–6.
28. Gomes D L, de Paiva A C, Silva A C, Braz G, de Almeida J D S, de Araújo A S and Gattas M. 2018 *Computers in Industry* 97 67–75.
29. Georgel P, Schroeder P, Benhimane S, Hinterstoisser S, Appel M and Navab N 2007 *6th IEEE and ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality* (Nara, Japan: IEEE) pp 111–5.
30. Grosch T, Eble T and Mueller S 2007. Proc. of the 2007 ACM symp. on Virtual reality software and technology (New York: ACM) pp 125–32.
31. Kato H and Billinghurst M 2004 3rd IEEE and ACM Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004) (Arlington VA USA: IEEE) p 305.
32. Tamaazousti M, Naudet-Collette S, Gay-Bellile V, Bourgeois S, Besbes B and Dhome M 2016 *Multimedia Tools and Applications* 75 9511–47.
33. Prakash S, Bahreman A, Nguyen L D and LiKamWa R 2019 Proc. of the 17th Annual Int. Conf. on Mobile Systems, Applications, and Services (MobiSys'19) (New York: ACM) pp 142–54.
34. Kruijff E, Swan J, and Feiner S 2010 Proc. of the 9th IEEE Int. Symp. on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) (Los Alamitos, CA: IEEE) pp 3–12.
35. Kytö M, Makinen A, Häkkinen J and Oittinen P 2013 *ACM Transactions on Applied Perception* Vol. 10 No. 1 6:1–21.
36. Sailer C, Rudi D, Kurzhals K and Raubal M 2019 18th World Conf. on Mobile and Contextual Learning: Future Learning Through Experiences and Spaces (mLearn 2019) (Delft, Netherlands) pp 69–76.
37. Ruth K, Kohno T and Roesner F 2019 *Proc. of 28th USENIX Security Symposium* (Santa Clara, CA, USA: USENIX Association) pp 141–58.
38. Lebeck K, Kohno T and Roesner F 2019 Proc. of 20th Int. Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (HotMobile '19) (New York: CM) pp 81–86.
39. *Introducing Vuzix M4000 Smart Glasses at CES2020* Available at: <https://youtu.be/ENUCXX2fz-c/> (accessed 04.03.2020).
40. *Website of Augmented Reality on Actemium* Available at: <https://www.actemium.nl/themas/augmented-reality/> (accessed 04.03.2020).
41. *About EcoStruxure Augmented Operator Advisor* Available at: <https://www.se.com/ww/en/product-range/64507-ecostruxure%E2%84%A2-augmented-operator-advisor/> (accessed 04.03.2020).
42. *Industrial Augmented reality with EcoStruxure™ Augmented Operator Advisor* Available at: <https://www.youtube.com/embed/LBoIUiyUKyE/> (accessed 04.03.2020).
43. Gimeno J, Casas S, Portales C and Fernandez M 2019 *DYNA* 94(2) 155-60.
44. Hofmann C, Staehr T, Cohen S, Stricker N, Haefner B and Lanza G 2019 *Procedia Manufacturing* 31 148–54.
45. Antonijević M, Sučić S and Keserica H 2018 *Energies* 11(3) 599:1–17.
46. Masood T and Egger J 2019 *Robot. and Comput. Integr. Manuf.* 58 181–95.
47. Kyeong-Beom P, Minseok K, Sung H, Choi J and Yeol L 2020 *Robot. and Comput. Integr. Manuf.* 63 101887:1–18.
48. Egger J and Masood T 2020 *Computers & Industrial Engineering* 140 106–95.

## ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

**Волков Михаил Анатольевич,**

E-mail: [volkov80@yandex.ru](mailto:volkov80@yandex.ru),

Уральский федеральный университет,

**Исаков Дмитрий Викторович,**

**Гоман Виктор Валентинович,**

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

**Аннотация.** В работе рассматриваются объекты управления с передаточной функцией первого порядка, являющиеся наиболее распространенными для получения в дальнейшем регуляторов в замкнутых системах автоматического регулирования. Так как при получении математической модели всегда выполняются упрощения реального объекта, становится понятно, что поведение системы автоматического управления реальным объектом будет отличаться от расчетного вследствие упрощения, а так же воздействия параметрических и сигнальных возмущений. В работе были получены передаточные функции компенсационных и некомпенсационных робастных регуляторов с первым и вторым порядком астатизма методом полиномиальных уравнений. После чего выполнен анализ замкнутых систем с регуляторами аналитическим методом коэффициентных оценок по характеристическому полиному замкнутой САР. Суть метода заключается в получении показателей формы и дальнейшем анализе изменения данных коэффициентов при вариациях параметров объекта управления. Результаты исследования представлены графически с помощью областей, позволяющих определить как изменится форма переходных процессов в замкнутой САР при вариации параметров процесса. Выполнено сравнение робастных регуляторов с традиционным. Результаты исследования подтверждены путем моделирования работы замкнутых САР при воздействии на объект управления параметрических возмущений, приводящих к изменению коэффициента усиления реального объекта управления.

**Ключевые слова.** Робастные регуляторы, полиномиальный синтез, вариации параметров объекта, метод коэффициентных оценок.

### **Введение**

Из-за упрощения математической модели объекта управления, а также воздействия на него внешних факторов, при реализации управления реальным технологическим объектом в процессе управления возникают отклонения от расчетных значений показателей качества управления. При сильном отклонении параметров объекта от расчетных величин процесс может становиться сильно колебательным или неустойчивым [1].

Робастные (robust) регуляторы позволяют компенсировать воздействие неучтенных или трудно учитываемых внешних факторов на процесс управления, если отклонение параметров от расчетных не превосходит 2–3 раз [2–7]. Множество работ посвящено робастным системам управления различными техническими объектами [8–15].

Наряду с параметрическим, возникает эффект сигнального парирования возмущений, действующих на объект. В этом случае, без усложнения структуры регулятора можно выполнить систему управления, сохраняющую качество управления на приемлемом уровне [3, 5, 6].

### **Методика исследования**

Для рассмотрения выбрана модель объекта первого порядка, используемая для представления объектов управления, как в электроприводе, так и для технологических объектов, например, нагревательные печи, регулирование отдельных технологических параметров при прокатке.

Передаточную функцию объекта управления представим в следующем виде:

$$W_o(p) = \frac{\tilde{k}_o}{\tilde{T}_o p + 1}, \quad (1)$$

где  $\tilde{k}_o$  и  $\tilde{T}_o$  – меняющиеся параметры объектов.

Алгоритмы работы регуляторов были получены с помощью метода полиномиальных уравнений [3, 7, 16, 17].

Анализ поведения процесса управления выполнен методом коэффициентных оценок [6, 18–20]. Этот метод обеспечивает возможность выполнения анализа системы аналитическим способом по характеристическому полиному замкнутой системы автоматического регулирования (САР).

Для полинома вида

$$A(p) = \sum_{i=0}^n a_i p^i, \quad (2)$$

можно составить из его коэффициентов  $a_i$  показатели формы  $\delta_i$  и быстродействия  $\tau$ :

$$\delta_i = \frac{a_i^2}{a_{i+1} a_{i-1}}; \quad \tau = \frac{a_1}{a_0}. \quad (3)$$

Для настройки на модульный оптимум значения показателей формы  $\delta_i = 2$  [3, 5]. При увеличении величины показателей формы и достижения ими значения  $\delta_i = 4$  процесс становится аperiодическим.

Общая структурная схема робастной системы представлена на рис. 1. Структура содержит в себе расчетную модель объекта управления  $W_M(p)$ , сигнал с которой сравнивается с реальным на сумматоре, и разница поступает в виде дополнительной обратной связи на вход регулятора. Сигнал рассогласования находится по соотношению

$$e(t) = y(t) - y_M(t). \quad (4)$$

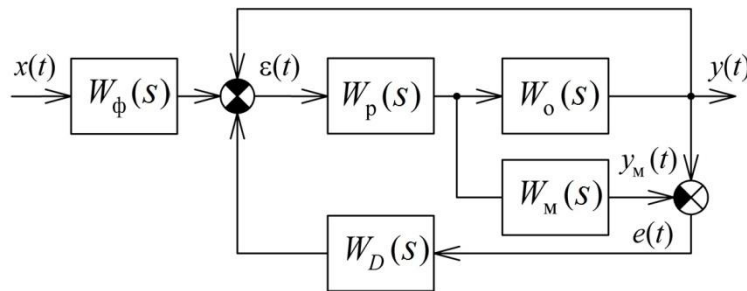


Рис. 1 Структурная схема робастной САР

В структурной схеме передаточная функция дополнительной обратной связи имеет вид

$$W_D(s) = \frac{k_D}{T_D s + 1},$$

где  $k_D$  – коэффициент усиления дополнительной обратной связи;  $T_D$  – постоянная времени звена дополнительной обратной связи.

В таблице представлены передаточные функции традиционного и робастного регуляторов  $W_p(s)$ , полученных методом полиномиальных уравнений (компенсационный и некомпенсационный), с порядком астатизма системы 1 и 2; замкнутых систем  $\Phi(s)$ ; звена коррекции  $W_D(s)$ ; графики показателей формы (штриховка показывает области

$\delta_i < 2$  и вид переходных процессов при вариации параметров объекта в два раза  $0.5 \leq \tilde{W} \leq 2$ ,  $0.5 \leq t \leq 2$  (1 точка:  $\tilde{W} = 2; t = 2$ ; 2 точка:  $\tilde{W} = 0.5; t = 0.5$ ). Быстродействие и порядок астатизма робастной и традиционной систем при сравнении выбирались одинаковыми, соотношение постоянных времени  $\mu = 0.1$ .

Относительные величины, принятые в табл. 1:

$$\mu = \frac{T_\mu}{T_o}; p_* = T_\mu p; \tilde{W} = \frac{\tilde{k}_o}{k_o}; d = \frac{T_D}{T_\mu}, \quad (5)$$

где  $T_\mu$  – постоянная времени, определяющая быстродействие системы;  $T_o$  – расчетное значение постоянной времени объекта управления.

В табл. 1 представлены передаточные функции некомпенсационных регуляторов (1 и 2 – первый порядок астатизма, 3 и 4 – второй). На рис. 2, 3 представлены результаты сравнения систем с регуляторами 1–4, выполненных с помощью моделирования и построены области показателей формы, соответствующие условию  $\delta_i > 2$ . Моделирование выполнялось при изменении параметров объекта в два раза.

Таблица 1  
Передаточные функции некомпенсационных регуляторов

	Традиционная САР	Робастная САР
1.	$W_p(s) = \frac{T_o}{k_o} \frac{2T_\mu(1-\mu)s_* + 1}{2T_\mu^2 s_*}$ $\tau = 2 \left[ 1 + \mu \left( \frac{1}{\tilde{W}} - 1 \right) \right]$	$W_p(s) = \frac{1}{k_o} \left( \frac{1}{\mu} - 1 \right)$ $W_D(p) = \frac{1}{1-\mu} \frac{s_* + \mu}{ds_* + 1}$ $\tau = 1 + d \left[ 1 + \mu \left( \frac{1}{\tilde{W}} - 1 \right) \right] \quad d = 1$
3.	$W_p(s) = \frac{1}{k_o} \frac{8(1-\mu)s_*^2 + 4s_* + 1}{8\mu s_*^2} \quad \tau = 4$	$W_p(s) = \frac{1}{k_o \mu} \frac{2(1-\mu)s_* + 1}{2s_*}$ $W_D(s) = \frac{2s_*(s_* + \mu)}{ds_* [2(1-\mu)s_* + 1]} \quad \tau = 2 \left( 1 + \frac{d}{2} \right) \quad d = 1$

Таблица 2  
Передаточные функции компенсационных регуляторов

	Традиционная САР	Робастная САР
5.	$W_p(s) = \frac{1}{k_o} \frac{s_* + 1}{\mu} \frac{1}{2s_*} \frac{1}{s_* + 1}, \quad \tau = \frac{2}{\tilde{W}} + \frac{1}{\mu}$	$W_p(s) = \frac{1}{k_o} \frac{T_o s_* + 1}{T_\mu s_* + 1}, \quad W_D(s) = \frac{1}{d} \frac{s_* + 1}{s_* + 1}, \quad d = 2$
7.	$W_p(s) = \frac{1}{k_o} \frac{s_* + 1}{\mu} \frac{4s_* + 1}{8s_*^2} \frac{1}{s_* + 1}, \quad \tau = \frac{1}{\mu} + 4$	$W_p(s) = \frac{1}{k_o} \frac{s_* + 1}{\mu} \frac{1}{2s_*} \frac{1}{s_* + 1}, \quad W_D(s) = \frac{2s_*}{2s_* + 1},$ $\tau = \frac{1}{\mu} + 2 + d, \quad d = 2$

В табл. 2 представлены передаточные функции компенсационных регуляторов (5 и 6 – первый порядок астатизма, 7 и 8 – второй). На рис. 4 и 5 представлены результаты сравнения систем с регуляторами 1–4, выполненных с помощью моделирования и построены области показателей формы, соответствующие условию  $\delta_i > 2$ . Моделирование выполнялось при изменении параметров объекта в два раза.

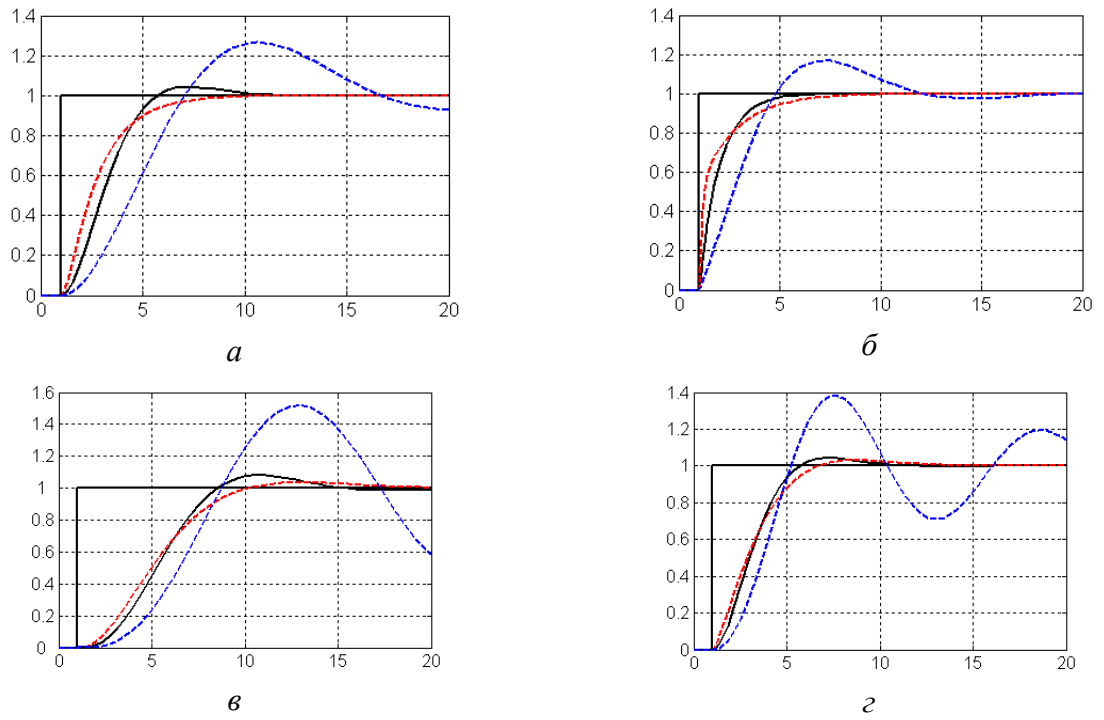


Рис. 2 Вид переходных процессов в традиционной (а, в) и робастной (б, г) системах

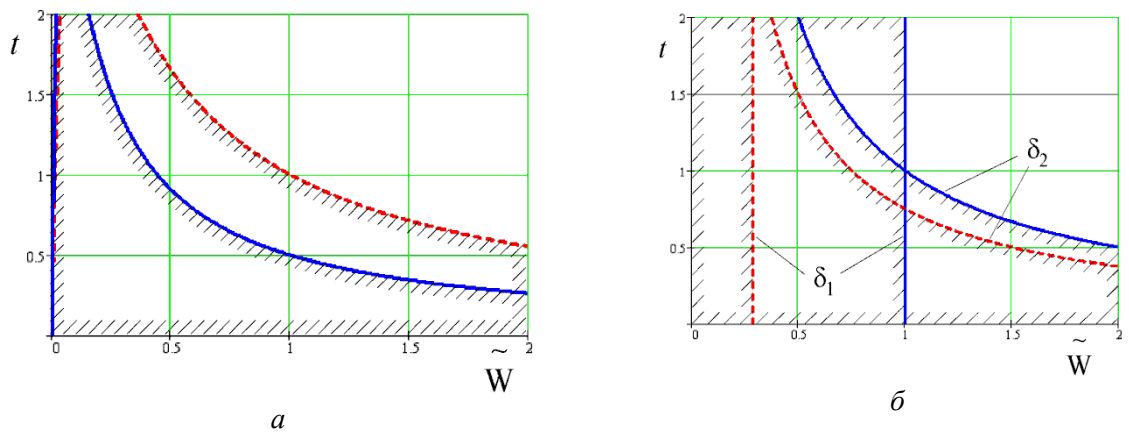


Рис. 3 Линии уровня  $\delta_i = 2$  показателей формы для регуляторов 1, 2 (а) и 3, 4 (б)

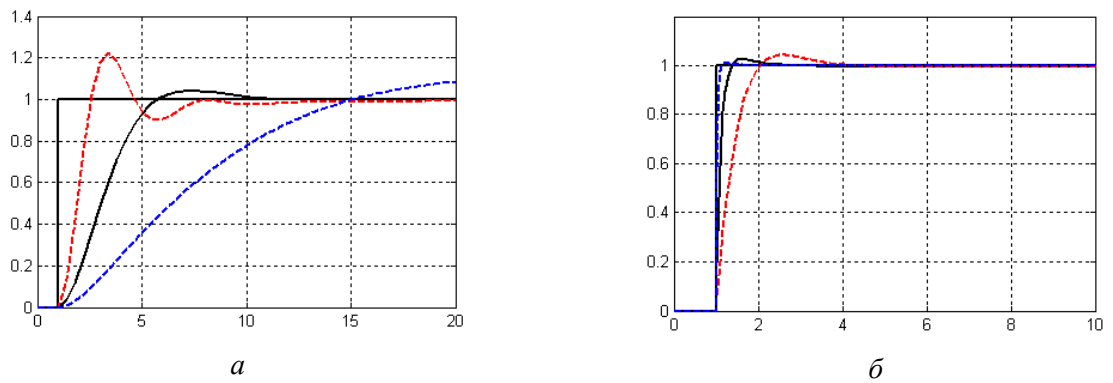


Рис. 4 (Начало)



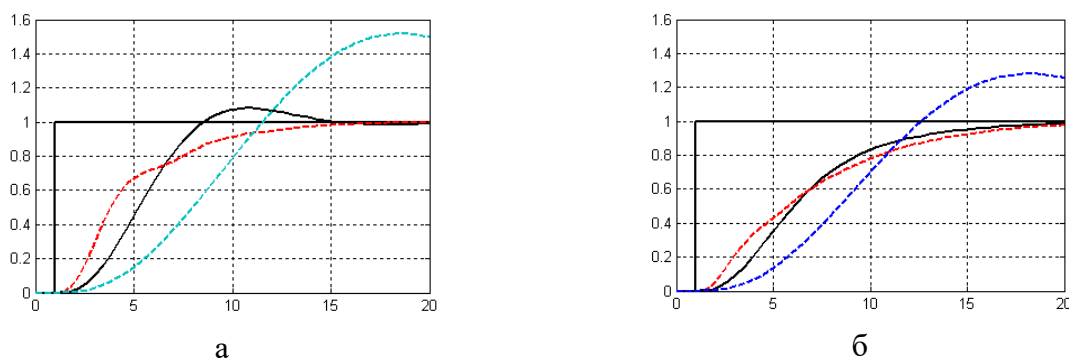


Рис. 4 (Окончание). Вид переходных процессов в традиционной (а, в) и робастной (б, г) системах

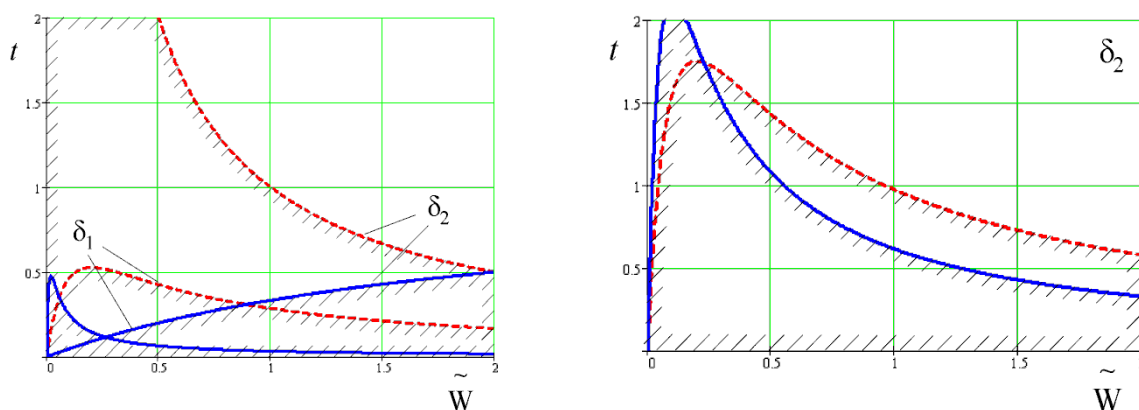


Рис. 5 Линии уровня  $\delta_i = 2$  показателей формы для регуляторов 5, 6 (а) и 7, 8 (б)

Анализ поведения линий уровня традиционной и робастной систем позволяет сделать для всех рассмотренных вариантов следующий вывод: область допустимого изменения параметров объекта регулирования при использовании робастных регуляторов со структурой на рис. 1 больше, чем при использовании традиционных систем. Это позволяет обеспечить лучшую стабильность формы и быстродействия переходных процессов, что подтверждается приведенными графиками переходных процессов в табл.

#### Библиографический список

1. Dorf R C and Bichop R H (2010) Modern control system NJ: Upper Saddle River. p. 749.
2. Polyak B and Sherbakov P 2002 Robust stability and control [in Russian], Moscow, Science p 303.
3. Ishmatov, Z. Sh., Volkov, M. A., Gurent'yev, E. A. Synthesis of electric drive systems invariant to parametric and external disturbances by the method of polynomial equations (2007) Russian Electrical Engineering, 78 (11), pp. 591–97. DOI: 10.3103/S1068371207110065.
4. На Q.P. and Alferov V.G. 1996 On the parameter-sensitivity problem in control system of DC-motor position drives *Elektrichestvo*, 1 pp. 47–53.
5. Volkov, M. A., Ishmatov, Z. S. Development and study of robust control system for dc thyristor electric drive using polynomial techniques (2009) Russian Electrical Engineering, 80 (9), pp. 517–23. DOI: 10.3103/S1068371209090107.
6. R. Yusupov and E. Rozenwasser 1999 *Sensitivity of Automatic Control Systems* London, NY, Washington: CRS Press 1999. p 436.
7. Naresh K. Sinha *Control System*. 2013 New Delhi: New Age International Limited p. 454.

8. Opeiko, O. F., Nesenchuk, A. A. Synthesis of the robust electric drive for robot control using pi controllers parameterization on the basis of root locus approach (2019) 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2019 ECCE Europe, статья № 8915531, DOI: 10.23919/EPE.2019.8915531.
9. Kochetkov, S. A., Krasnova, S. A., Utkin, V. A. Robust control for synchronous electric drive under uncertainty conditions (2018) AIP Conference Proceedings, 2046, статья № 020047, DOI: 10.1063/1.5081567.
10. Son, Y. I., Kim, I. H., Choi, D. S., Shim, H. Robust cascade control of electric motor drives using dual reduced-order PI observer (2015) IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62 (6), pp. 3672–3682. DOI: 10.1109/TIE.2014.2374571.
11. Son, Y. I., Choi, D. S., Cho, K. H., Kim, I. H., Kang, S. H. Robust cascade control of electric motor drives using PI observers (2013) Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, pp. 352–358. DOI: 10.2316/P.2013.794–057.
12. Sung, W., Shin, J., Jeong, Y.-S. Energy-efficient and robust control for high-performance induction motor drive with an application in electric vehicles (2012) IEEE Transactions on Vehicular Technology, 61 (8), pp. 3394–3405. DOI: 10.1109/TVT.2012.2213283.
13. Weinmann A 1991 *Uncertain Models and Robust Control* Wien: Springer-Verlag, p 707.
14. Ackermann J 1993 *Robust control: system with uncertain physical parameters* New York: Springer-Verlag, p 406.
15. Zhou K Doyle J C and Glover K 1996 *Robust and optimal control*. NJ: Prentice Hall, p. 538.
16. Ishmatov, Z. S., Plotnikov, Y. V., Gurent'Ev, E. A. Robust current and speed controllers of the frequency-controlled induction electric drive (2014) Russian Electrical Engineering, 85 (9), pp. 570–574. DOI: 10.3103/S1068371214090065.
17. Ishmatov, Z., Polyakov, V., Plotnikov, I. Robust currents control in the electric drive (2017) 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076116.
18. N. Petrov, N. I. Sokolov, A. V. Lipatov, et al., *Automatic-Control Systems for Objects with Variable Parameters* [in Russian], Mashinostroenie, Moscow (1986).
19. K. S. Matviichuk, “Stability of nonstationary automatic-control systems of variable structure in forced motion,” *Int. Appl. Mech.*, 39, No. 10, 1221–30 (2003).
20. K. S. Matviichuk, “Technical stability of forced motion in nonstationary automatic-control systems of variable structure,” *Int. Appl. Mech.*, 40, No. 1, 103–14 (2004).

## РАЗРАБОТКА ИНДИКАТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ХОЛДИНГА

Долженкова Елена Владимировна,

E-Mail: [lenag1981@mail.ru](mailto:lenag1981@mail.ru),

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ,

Юрьева Лариса Владимировна,

E-Mail: [lv\\_yurieva@mail.ru](mailto:lv_yurieva@mail.ru),

Уральский федеральный университет,

г. Екатеринбург

**Аннотация.** В статье представлена индикативная система конкурентно-сбалансированных показателей, позволяющая оценить разные сферы деятельности промышленных предприятий холдинга с целью повышения его информационного потенциала. Для управления в деятельности металлургических холдингов предлагается объединить учетные и аналитические процедуры, используемые для принятия стратегических решений с целью повышения информационного потенциала. Мониторинг деятельности холдинга основан на данных стратегического управленческого учета и конкурентного анализа. С этой целью авторская индикативная система показателей включает три блока: стратегический, оперативный, тактический. При классификации показателей по уровням управления учитываются следующие моменты: предварительный анализ структурных элементов в составе каждого показателя, рассмотрение триггеров, необходимость экспертной оценки. Результаты проведенных расчетов позволяют по динамике значений показателей выявить положительные тенденции по одним предприятиям и отрицательные – по другим предприятиям холдинга, помогают определить причины роста или снижения интегральной оценки одного металлургического предприятия по сравнению с другим, что повышает эффективность принятия стратегических решений в управлении холдингом. Кроме того, предлагаемая модель позволяет определить допущения ее внедрения для каждого металлургического предприятия, что повышает информационный потенциал всего холдинга.

**Ключевые слова.** Индикативная система конкурентно-сбалансированных показателей, металлургические холдинги, мониторинг, триггеры, информационный потенциал.

Актуальность вопроса эффективного принятия стратегических решений менеджментом металлургических холдингов в условиях высокой неопределенности находится в тесной взаимосвязи с информационной подготовкой данных для этого. Современная цифровая экономика требует создания такой учетно-аналитической модели, которая бы могла удовлетворять растущие информационные запросы управляющей системы. Такая модель должна, с одной стороны, соответствовать стратегии развития предприятия металлургического холдинга, а с другой, быть его информационным потенциалом.

Вопросами стратегического менеджмента, его оценкой и анализом занимались многие зарубежные и отечественные ученые. Изучению инновационных стратегий посвящены работы [1, 2]. Авторы предлагают инновационные стратегии с конкретными наборами инновационных возможностей продукта. Они считают, что более сильный акцент на свойствах продукта и более широкий доступ к рынку стимулируют эффективную репликацию существующих возможностей предприятия, принося немедленную отдачу.

Эмпирическим исследованиям в области оценки эффективности деятельности организаций посвящены работы [3, 4], авторы которых доказывают, что финансовые

показатели являются критически важной проблемой при ее измерении. Ученые рассмотрели механизмы управления эффективностью управления стратегическими инициативами на основе анализа критических процессов продаж в металлургическом бизнесе [4].

Важным аспектом принятия стратегических решений в современных условиях становятся предпринимательские риски [5–8]. Динамические и организационные возможности и их влияние на работу предприятий исследованы в работах [9–13].

Основной источник корпоративной эффективности – управление бизнес-процессами – рассмотрен в следующих работах [7, 14].

Анализу и оценке конкурентных преимуществ в стратегическом менеджменте посвящены следующие работы [15–18]. Методы конкурентного анализа в современной действительности исследуются в таких работах [19–23].

Проведенный обзор научных работ позволил обобщить накопленный опыт, особенности стратегического анализа для оценки деятельности металлургических предприятий в условиях неопределенности среды и отметить на настоящий момент недостаточность исследования вопросов многоаспектного анализа конкурентоспособности металлургических предприятий, а также разработки конкурентно-стратегической модели оценки деятельности металлургических предприятий.

Все вышеуказанное определяет актуальность темы исследования.

Состояние конкуренции в отрасли, согласно концепции Портера, зависит от влияния пяти основных сил. Эти конкурентные силы определяют привлекательность отрасли и позиции холдинга в конкурентной борьбе. В совокупности они оценивают предельный потенциал прибыли в отрасли, колеблющийся от значительного до минимального. Давление совокупной силы на предприятия металлургического холдинга может быть ощутимым для всех соперничающих сторон. Для того чтобы справиться с ним, стратегия должна быть основана на тщательном анализе происхождения каждой составляющей. Знание этих основных источников конкурентного давления обеспечивает прочный фундамент для стратегического плана действий. Оно позволит выявить сильные и слабые стороны предприятий холдинга, дать четкое обоснование позиционирования холдинга в металлургической отрасли. Одним из самых значимых индикаторов условий конкуренции является уровень ее интенсивности на рынке, который определяется с помощью нескольких более частных показателей. Самыми важными из них являются рентабельность рынка, темпы роста рынка, тип рынка, его объем и характер распределения рыночных долей конкурентов, степень концентрации на рынке [4].

Таким образом, появляется необходимость в разработке индикативной системы показателей (далее – ИСП) в холдинговых структурах, позволяющей объединить учетные и аналитические процедуры в рамках формирования и совершенствования стратегии деятельности холдинга для повышения его информационного потенциала.

Функционирование ИСП основано на данных стратегического управленческого учета (далее – СУУ) и стратегического конкурентного анализа в холдинговых структурах (далее СКАХС). Итогом деятельности является формирование системы конкурентно-сбалансированных показателей (далее – СКСП), охватывающей основные сферы деятельности холдинга.

При разработке СКСП для предприятий металлургического холдинга следует оценить факторы, относящиеся к статичным (в краткосрочном периоде) стратегическим контекстам и к динамичной (в том же краткосрочном периоде) системе целей. При этом сама ИСП в работе холдинговых структур образует пространство, в котором формулируются цели и разрабатывается СКСП для каждого предприятия металлургического холдинга.

Информационное обеспечение СКСП включает следующие требования к источникам информации: полезность, релевантность, своевременность, актуальность, сопоставимость. Авторская модель предусматривает анализ деятельности холдинга по

шести ключевым сферам. На рис. 1 показано движение информационных потоков в СКСП. Особая роль отводится СУУ и СКАХС. На основании этих анализов можно сформировать информацию о конкурентах и внутрихолдинговом пространстве.

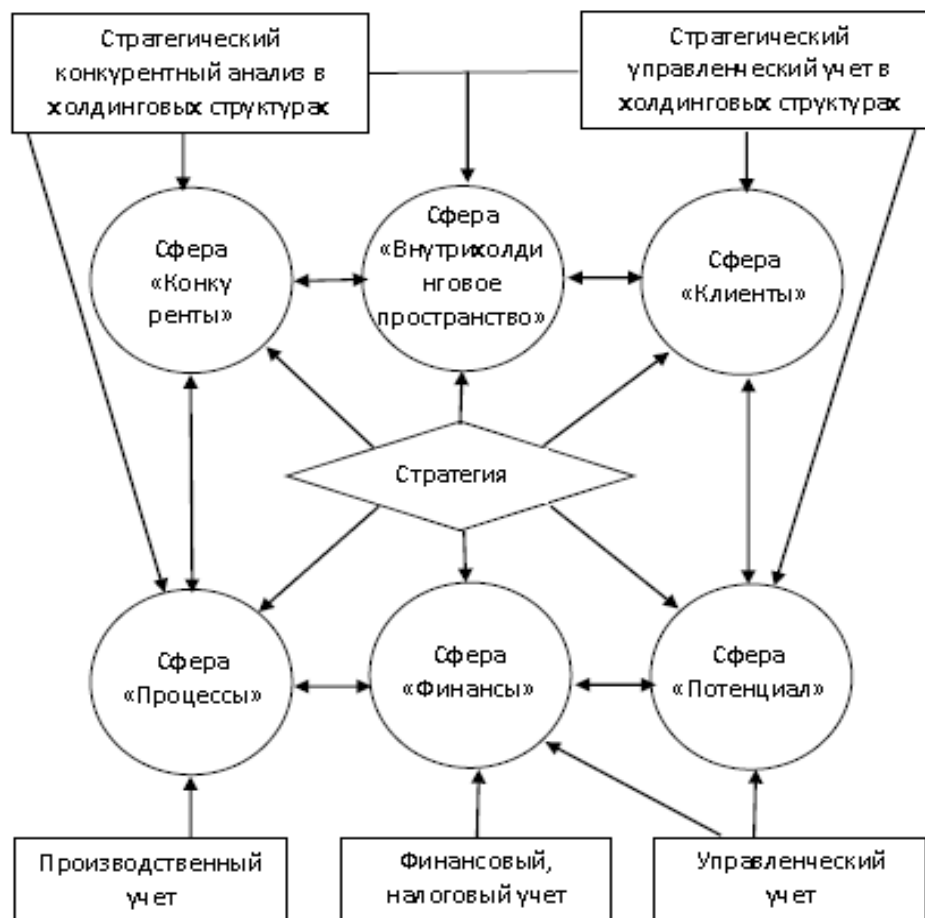


Рис. 1 Движение информационных потоков в СКСП

При построении системы конкурентно-сбалансированных показателей ИСП для металлургического холдинга рекомендуется сначала выполнить классификацию таких показателей с учетом этапов анализа его среды, обозначенными на рис. 2 (1 группа показателей – стратегический блок, 2 группа показателей – оперативный блок, 3 группа показателей – тактический блок). Кроме этого, классификация должна учитывать значимость показателя для принятия управленческих решений металлургического холдинга, которая определяется на основе экспертной оценки.

Стратегический блок показателей характеризует миссию и стратегические цели холдинга. С помощью показателей этого блока можно задать ориентиры и расставить акценты в деятельности предприятий холдинга на ближайшие 4–5 лет, что повысит эффективность стратегического планирования.

Оперативный блок показателей необходим в основном для оперативного планирования. Показатели этого блока помогают связать стратегию металлургического предприятия холдинга с его оперативной деятельностью.

Тактический блок показателей используется только для текущей деятельности. Как правило, эти показатели отражают частные процессы и задачи, управление которыми осуществляется в краткосрочном периоде.

Этапы стратегического управления холдингом	Этапы анализа среды		
	Анализ внешней среды холдинга	Анализ внутренней среды холдинга	Анализ внешней среды предприятий холдинга
Анализ деятельности холдинга	↓	↓	↓
Планирование и разработка стратегии	-->	-->	-->
Реализация стратегии, контроль её выполнения и принятие управленческих решений	↓	↓	↓

Рис. 2 Основные этапы СКСП ИСП

При формировании трех блоков показателей необходимо использовать следующий алгоритм:

- провести анализ основных элементов, которые участвуют в расчете показателя;
- выявить основные триггеры и изучить возможные способы воздействия на них;
- на основе анализа способов воздействия принять решение по отнесению показателя к тому или иному блоку.

Авторская ИСП позволяет на основе экспертной оценки классифицировать показатели на следующие три группы важности.

*Группа 1.* К данной группе относятся показатели, имеющие наибольшую значимость для реализации стратегии холдинга. Эти показатели отражают общие процессы, происходящие в различных сферах СКСП. Для планирования и учета таких показателей предлагается разработать специальный регламент.

*Группа 2.* Показатели этой группы отражают частные процессы. Как правило, данные показатели регламентируют нормативные значения, и их планирование и учет с заданной периодичностью не являются обязательными. Значения показателей задаются в определенных интервалах. Такие показатели будут учитываться при реализации стратегии холдинга только в случае выхода их значений за рамки заданного интервала.

*Группа 3.* К данной группе отнесены показатели, которые измеряют частные процессы и задачи, а также дублируют показатели первой и второй групп.

Такой анализ позволит существенно повысить информационный потенциал холдинга в принятии стратегических решений.

На основе проведенного анализа выявлены показатели разных сфер СКСП. Определено, что массив показателей СКСП является набором различных измерительных инструментов, которые можно сгруппировать в соответствии с основными аспектами деятельности металлургического холдинга. Представленный спектр показателей является неокончательным и может редактироваться по требованию пользователей.

Расчет показателей предлагается осуществлять по следующим сферам деятельности: управление финансами; управление процессами; управление инновациями; сервис; внутрихолдинговое пространство; конкурентоспособность.

Каждую из указанных сфер характеризует система индексов и показателей. Показатели характеризуют качественную сторону каждой сферы СКСП, а индексы – ее количественную составляющую. На основе рассчитанных индексов необходимо осуществить интегральную оценку влияния каждой сферы индексов на конкурентоспособность предприятия холдинга в целом.

На основании предложенной модели авторами был осуществлен расчет индексов по всем сферам СКСП металлургических предприятий, входящих в состав Объединенной металлургической компании (далее ОМК): Выксунский металлургический завод (далее ВМЗ), Чусовской металлургический завод (далее ЧМЗ) и Щелковский металлургический завод (далее ЩМЗ).

По результатам расчета можно выявить позитивные тенденции в изменениях значений показателей по одним предприятиям (например, ВМЗ, ЧМЗ) и негативные тенденции в изменениях значений показателей по другим предприятиям (например, ЩМЗ). Следует отметить, что модель внедрялась на предприятия со следующими допущениями:

– индексы были определены только по тем направлениям, по которым имелась информация;

– в качестве основной продукции по предприятиям были взяты объемы производства чугуна, стали, металлопродукции в целом.

По результатам расчета можно сделать вывод о том, что наиболее конкурентоспособным является ВМЗ. Именно по нему рассчитанные индексы практически по всем сферам превышают значения других предприятий. Кроме того, расчеты позволяют определить причины отставания или превышения интегральной оценки одного предприятия по сравнению с другим, что повышает эффективность принятия стратегических решений.

Таким образом, авторская ИСП может использоваться для принятия стратегических решений с целью повышения информационного потенциала металлургического холдинга, мониторинг деятельности которого основан на данных стратегического управленческого учета и конкурентного анализа. По динамике значений ИСП можно определить положительные тенденции по одним предприятиям и отрицательные – по другим предприятиям холдинга, а также выявить причины роста или снижения интегральной оценки одного металлургического предприятия по сравнению с другим, что повышает эффективность принятия стратегических решений в управлении холдингом.

#### Библиографический список

1. Branzei O, Vertinsky I 2006 Journal of Business Venturing 21 (1) pp 75–105
2. McKenny A F, Short J C, Ketchen D J, Payne G T, Moss T W 2018 Strategic Entrepreneurship Journal 12 (4) pp 504–521
3. Carton R B, Hofer C W 2006 Measuring Organizational Performance: Metrics for Entrepreneurship and Strategic Management Research p 296
4. Rocha C F, Duclos L C, da Veiga C P, dos Santos C B, Neves N A F 2016 International Business Management 10 (4) pp 357–369
5. Caves R E, Porter M E 1977 Quarterly Journal of Economics 91 (2) pp 241–261
6. Covin J G, Lumpkin G T 2011 Entrepreneurship: Theory and Practice 35 (5) pp 855–872
7. Covin J G, Wales W J 2012 Entrepreneurship: Theory and Practice 36 (4) pp 677–702
8. Shams S M R 2016 Marketing Intelligence and Planning 34 (5) pp 671–691
9. Henri J-F 2006 Accounting, Organizations and Society 31 (6) pp 529–558
10. Teece D J, Pisano G, Shuen A 1997 Strategic Management Journal 18 (7) pp 509–533
11. Andreeva T, Ritala P 2016 Baltic Journal of Management 11 (3) pp 238–259
12. Barney J 1991 Journal of Management 17 (1) pp 99–120
13. Fainshmidt S, Pezeshkan A, Lance Frazier M, Nair A, Markowski E 2016 Journal of Management Studies 53 (8) pp 1348–1380
14. Afflerbach P, Bolsinger M, Röglinger M 2016 Business Research 9 (2) pp 335–375

15. Ansoff I 2015 New corporate strategy (SPb.: Peter Com) p 408
16. Gordon Ya 2006 Target competition (M.: Top) p 368
17. Kaplan Robert C 2014 Strategy-oriented organization (M.: Olympus Business) p 392
18. Porter M 2005 Competitive strategy: a technique for analyzing industries and competitors (M.: Alpina Business Books) p 454
19. Blank I A 2013 Financial strategy of the enterprise (Kiev: Nika- Center, Elga) p 345
20. Iurieva L, Kazakova M, Dolzhenkova E 2015 Costs management accounting at industrial enterprises in conditions of the innovation economics (Moscow: RUSCIENCE) p 290
21. Koveny M 2004 Strategic Breakthrough: Technologies for Implementing Corporate Strategy to Life (M.: Alpina Business Books) p 232
22. Mintzberg G 2001 Strategic process (SPb: Peter) p 567
23. Rampersad Hubert K 2014 Individual Balanced Scorecard (Olimp-Business) p 176

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПАО «УРАЛМАШЗАВОД» ДЛЯ ФАБРИК ОКУСКОВАНИЯ**

**Кожемяко Алексей Петрович,  
Костина Наталья Александровна,  
Вяткин Андрей Анатольевич,  
Калугин Ярослав Ильич,  
E-Mail: [y.kalugin@uralmash.ru](mailto:y.kalugin@uralmash.ru),  
Камалов Виталий Маратович,  
Банников Дмитрий Владимирович,  
ПАО «Уралмашзавод»,  
г. Екатеринбург**

**Аннотация.** ПАО «Уралмашзавод», в 2011–2019 гг. поставил и запустил ряд современных комплексов Фабрик окомкования и аглофабрик различной производительности в России и за рубежом. В каждом из проектов применяются уникальные решения по технологии и оборудованию, обеспечивающие производство окатышей и агломерата с показателями на уровне лучших мировых аналогов.

На обжиговой машине площадью технологических зон 108 м<sup>2</sup>, введенной в эксплуатацию на предприятии *Minera Steel & Power Ltd.* (Индия) в 2014 г., впервые в мировой практике в промышленном масштабе используются двухтопливные горелочные устройства, гибкая система регулирования технологических параметров процесса позволяет обеспечивать работу фабрики на повышенной по сравнению с номинальной производительности по годным окатышам без отклонений по качеству готовой продукции и удельным значениям расходов энергоносителей.

На ПАО «Михайловский ГОК» (Михайловский горно-обогатительный комбинат) в 2016 г. успешно введена в эксплуатацию фабрика окомкования № 3 производительностью 5 млн т/год. ПАО «Уралмашзавод» в данном проекте выступил в роли комплексного поставщика инжиниринга, оборудования и услуг. В 2011–2014 гг. для ряда зарубежных предприятий выполнены поставки комплексов современного оборудования обжиговых машин площадью 189 и 278 м<sup>2</sup>. В сфере агломерационного оборудования для индийских заказчиков в рамках консорциумных соглашений на условиях выполнения проектов «под ключ» успешно реализуются реконструкция аглофабрики предприятия *Vizag Steel Plant*, а также строительство новой аглофабрики № 2 на предприятии *Bokaro Steel Plant*.



**Ключевые слова.** Обжиговая машина, агломашина, окатыши, агломерат, фабрика окомкования, аглофабрика, энергоэффективность, эксплуатационные показатели.

С 1934 г. ПАО «Уралмашзавод» проектирует и изготавливает агломерационные и обжиговые конвейерные машины и другое основное технологическое оборудование Фабрик окомкования и аглофабрик (барабанные, шнековые и роторные смесители, барабанные и чашевые окомкователи, дробилки сырых окатышей, роликовые и вибрационные грохоты, специальные конвейеры, двухклапанные затворы, шаровые барабанные мельницы и др.). Было реализовано более 250 крупных проектов, включавших в себя комплектную поставку технологических линий:

- фабрик окомкования с обжиговыми конвейерными машинами полезной площадью от 72 до 592 м<sup>2</sup> суммарной производительностью около 85 млн т/год окатышей различного назначения – офлюсованные и неофлюсованные для металлизации и доменного производства, цветной металлургии и ферросплавного производства. Среди перерабатываемого сырья представлены гематитовые и магнетитовые концентраты, железорудные концентраты с высоким содержанием серы и кремнезема, титаномагнетиты с высоким содержанием ванадия, оксидные и карбонатные марганцевые руды, медно-никелевые концентраты;

- аглофабрик с агломерационными машинами площадью спекания от 18 до 378 м<sup>2</sup> суммарной производительностью около 195 млн т/год агломерата. В переработке находятся магнетитовые и гематитовые концентраты и аглоруды, отходы металлургических, коксохимических и известково-доломитовых производств, марганцевые, хромовые, фосфористые и медно-никелевые руды.

В 2014 г. введена в эксплуатацию обжиговая машина МОК-108 (табл. 1) ПАО «Уралмашзавод» в составе Фабрики окомкования номинальной производительностью 0,6 млн т/год для предприятия *Minera Steel and Power Pvt. Ltd.*, г. *Ballary*, штат *Karnataka*, Индия. Ранее в Индии на фабриках окомкования небольшой производительности (до 1 млн т в год) использовалась технология «*Grate-Kiln*» («решетка – трубчатая печь – кольцевой охладитель»), однако ПАО «Уралмашзавод» в ходе тендера обосновал экономическую целесообразность использования технологию конвейерной машины («*Straight-Grate*»), выгодно отличающуюся от «*Grate-Kiln*» по капитальным затратам на строительство и удельным расходам энергоносителей. МОК-108 стала первой в Индии обжиговой машиной конвейерного типа для фабрики окомкования небольшой производительности, обеспечивающая производство окатышей для металлизации с качеством на уровне лучших мировых стандартов. Машина перерабатывает сырые окатыши из концентратов, железо в которых на 100 % представлено гематитом. В шихту сырых окатышей наряду с концентратом добавляются связующее (бентонит), флюсы (известняк и/или доломит) и твердое топливо (коксовая мелочь, угольная мелочь или антрацит).

Обжиговая машина МОК-108 обладает развитой системой управления, которая позволяет гибко регулировать параметры процесса при изменении сырьевых условий и требований к годным окатышам.

Тепловая схема машины (разработанная с участием ООО «НПВП ТОРЭКС») предусматривает использование шести технологических вентиляторов в отличие от пяти, применяющихся в традиционных схемах, что позволяет снизить удельный расход электроэнергии за счет уменьшения количества запорно-регулирующих клапанов. Для снижения расхода топлива и электроэнергии на производство окатышей предусмотрена развитая система рециркуляции газоздушных потоков внутри газовой системы обжиговой машины, обеспечиваемой их перемещением как с помощью рециркуляционных тягодутьевых машин, так и прямым перетоком.

Таблица 1  
Технико-экономические показатели обжиговой машины МОК-1-108  
*Minera Steel and Power Pvt. Ltd*

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя	
		проектное	достигнутое*
1	Активная площадь, м <sup>2</sup>	108	108
2	Ширина колосникового поля обжиговой тележки, м	3,0	3,0
3	Производительность по годным окатышам, т/сут: номинальная максимальная	1875 2500	1908,76 2508
4	Удельный расход топлива (сжигаемого в горелках и используемого в шихте сырых окатышей), ккал/т	265 000	247 767,86
5	Удельный расход электроэнергии на тягодутьевые машины, кВт·ч/т	25	18,33
6	Прочность на холодное сжатие, кг/окатыш	250	233
7	Индекс истираемости по ISO 3271 (-0,5 мм), %	≤5	4,48
8	Индекс барабанной прочности по ISO 3271 (+6,3 мм), %	≥94	93,91
9	Доля фракции 9÷16 мм в обожжённых окатышах, %	≥85	89,12

\* – среднее за время гарантийных испытаний 27.11–01.12.14

Термообработка слоя сырых окатышей производится в пяти технологических зонах: сушки, нагрева, обжига, рекуперации и охлаждения.

Зона сушки включает две газоздушные камеры (ГВК) №№ 1 и 2 и состоит из двух секций – сушки 1 и 2.

В секции сушки 1 слой окатышей сушится за счет продува теплоносителя (фильтрация газа снизу вверх) с температурой ~281 °С и напором дымососа F-2. Выходящий из слоя окатышей влажный газ с температурой 87 °С, разбавляется горячим газом с температурой 360 °С от дымососа F-3 до температуры выше точки росы (температуры конденсации), затем очищается от пыли в газоочистке ESP-2 и дымососом F-6 сбрасывается в дымовую трубу.

В секции сушки 2 слой окатышей сушится прососом теплоносителя (фильтрация газа сверху вниз) с температурой 360 °С от дымососа F-3.

Зона нагрева включает две ГВК (3 и 4).

Нагрев слоя окатышей производится за счет прососа теплоносителя с температурой 500–900 °С, образованного смешиванием высокотемпературного переточного воздуха ( $t = 850/900$  °С) и газа-теплоносителя ( $t = 360$  °С) дымососа F-3.

В ГВК №№ 2–4 выходящие из слоя в сборный коллектор влажные газы транспортируются дымососом F-1 через газоочистку ESP-1 и после очистки от пыли сбрасываются в дымовую трубу.

Зона обжига включает три ГВК (№№ 5–7). Обжиг слоя осуществляется за счет теплоты топлива для горелок, сжигаемого в трех парах инжекционных горелок, обеспечивающих температуру над слоем в диапазоне 900–1250 °С. Просос продуктов горения через слой окатышей осуществляется дымососом F-3. В слое заканчиваются процессы десульфурации, горения углерода, разложения карбонатов и развивается процесс спекания и упрочнения окатышей.

Зона рекуперации имеет в своем составе одну ГВК № 8 и предназначена для нагрева окатышей нижнего горизонта слоя за счет переноса теплоты из верхней части в нижнюю часть слоя. Теплоносителем в слое является высокотемпературный воздух с температурой около 950 °С, передаваемый надслоевым перетоком из зоны охлаждения 1. Зона обеспечивает спекание и упрочнение окатышей нижнего горизонта слоя.

Газы из зон обжига и рекуперации просасываются через слой дымососом F-3 в сборный коллектор, а затем транспортируются: часть – в тракт дымососа F-2, часть – в зону сушки 2, для разбавления высокотемпературного переточного воздуха над ГВК № 3, а избытки теплоносителя сбрасываются в тракт дымососа F-6.

Зона охлаждения включает четыре ГВК №№ 9–12 и разделена на две секции – охлаждения 1 и охлаждения 2. Зона охлаждения предназначена для охлаждения слоя окатышей до средней температуры не более 100 °С и для передачи теплоты охлаждаемых окатышей в другие технологические зоны.

Для уменьшения потерь теплоносителя с перетоками между ГВК различных направлений фильтрации газов через слой ГВК № 2 и № 8 имеют поперечные уплотнения.

Передача высокотемпературного воздуха из зоны охлаждения 1 в другие технологические зоны осуществляется по коническому переточному коллектору переменного сечения (диаметр на входе – 3,24 м, на выходе – 2 м). Переток высокотемпературного воздуха осуществляется за счет перепада давления между зоной охлаждения 1 ( $P = 10\text{--}15$  мм вод. ст.) и зонами сушки, нагрева и обжига  $P = -(2\text{--}6)$  мм вод. ст.

Газоходная система рециркуляционных и сбросных газов состоит из сборных и раздаточных коллекторов, тягодутьевых машин, систем газоочистки и дроссельных заслонок. Для транспортировки воздуха, технологических и аспирационных газов в системе используется шесть технологических вентиляторов. Технологические газы, не участвующие в рециркуляции, очищаются от пыли в газоочистках ESP-1 и ESP-2, сбрасываются дымососами F-1 и F-6 в дымовую трубу. На рециркуляционных газоздушных потоках очистка от пыли не требуется.

Обжиговая машина имеет запас производительности, составляющий одну треть от номинальной. Причем, при работе на максимальной производительности не происходит снижения качества готовой продукции и увеличения ее себестоимости.

На обжиговой машине применяются инжекционные горелки, работающие как на мазуте, так и на угольном газе. В мире нет аналогов использования угольного газа в производстве окатышей.

В 2007 г. стартовал уникальный для отечественной промышленности проект, выполняемый в рамках соглашения между ОАО «Холдинговой компанией «Металлоинвест» и ПАО «Уралмашзавод» – создание на ПАО «Михайловский ГОК» технологического комплекса обжиговой машины № 3 (ТКОМ № 3) [1].

Новая Фабрика окомкования в составе участков приемки и сгущения пульпы, фильтрации, дозирования и смешивания, окомкования, обжига, сортировки, отгрузки, объектов энергетической инфраструктуры а также складов концентрата и окатышей проектной производительностью 5 млн т/год является примером успешной реализации комплексного подхода ПАО «Уралмашзавод» к созданию крупных объектов в сфере окускования металлургического сырья, включавшего в себя выполнение следующих работ (с привлечением на субконтракты ООО «НПВП ТОРЭКС», ЗАО «Механобр-Инжиниринг», российских и зарубежных изготовителей оборудования и систем):

- разработку Технологического Регламента;
- разработку проектной документации Фабрики окомкования;
- разработку проекта автоматизированного электропривода и АСУ;
- комплектную поставку механического, электротехнического оборудования, технических средств АСУ ТП, футеровки и теплоизоляции, кабельной продукции;
- обучение промышленно-производственного персонала ПАО «МГОК»;
- шефнадзор за монтажом, вводом в эксплуатацию и испытаниями оборудования и систем.

Запущенный в промышленную эксплуатацию в сентябре 2015 г. ТКОМ № 3 ПАО «Михайловский ГОК» демонстрирует производственно-технические показатели, соответствующие лучшим мировым практикам:

- прочность на холодное сжатие по ISO 4700 – не менее 250 кг/окатышей;

- удельный расход природного газа – 9–10 Нм<sup>3</sup>/т годных окатышей;
- удельный расход электроэнергии по фабрике (включая объекты энергетической инфраструктуры) – не более 36 кВт×ч/т годных окатышей [3].

Также ПАО «Уралмашзавод» в 2011–2014 гг. выполнен ряд поставок оборудования современных обжиговых машин для Украины и Индии.

Таблица 2

Перечень выполненных проектов ПАО «Уралмашзавод» по Фабрикам окомкования

№ п/п	Заказчик	Тип проекта	Активная площадь машины, м <sup>2</sup>	Производительность номинальная, млн т/год	Удельный расход топлива, ккал/т	Удельный расход электроэнергии на тягодутьевые машины, кВт·ч/т	Тип годных окатышей
1	ЧАО «СЕВГОК», Украина	Реконструкция	278,25	2,1	116 530	24	Офлюсованные, ДП
2	<i>Crest Steel &amp; Power Pvt. Ltd., Rajnandgaon, Chhattisgarh, Индия</i>	Новое строительство	189	1,2	250 000	26	DRI, ДП
3	<i>Shree Jagannath Steels &amp; Power Ltd., Barbil, Odisha, Индия</i>	Новое строительство	189	1,2	250 000	26	DRI, ДП

\* – DRI – окатыши для металлзации; ДП – для доменного производства.

Обжиговая машина *LURGI-278B* ЧАО «СЕВГОК», изначально запущенная в эксплуатацию в 1977 г., к концу 1980-х гг. полностью выработала свой ресурс и была выведена из эксплуатации. В связи с необходимостью увеличения производства окатышей в конце 2000-х гг. возникла необходимость коренной реконструкции *LURGI-278B*. ПАО «Уралмашзавод» выполнил детальный аудит оборудования и металлоконструкций обжиговой машины, на основе которого была выработана концепция замены морально и физически устаревшего оборудования машины на современное с установкой на существующие фундаменты и опорные металлоконструкции. В рамках реализации проекта были поставлены загрузочное устройство, комплект обжиговых тележек ТО-3,5×1,5, разгрузочное устройство, продольные и бортовые уплотнения, прямолинейные и криволинейные направляющие, привод ленты и др. Тепловая схема машины также была модернизирована для обеспечения возможности производства высокоофлюсованных окатышей с основностью 1,2.

На предприятии *Shree Jagannath Steels & Power Ltd.* в августе 2018 г. обжиговая машина МОК-189 запущена в эксплуатацию и демонстрирует проектные показатели работы. В мае 2020 г. машина произвела 132 110 т годных окатышей, т. е. более чем на 30 % превышена номинальная производительность. В комплексе фабрики в технологической цепочке с машиной функционируют участки фильтрации пульпы с пресс-фильтрами, интенсивный вертикальный смеситель шихты, чашевые окомкователи Ø7,5 м.

В сфере агломерационного оборудования ПАО «Уралмашзавод» с 2014 г. реализует проект реконструкции аглофабрики *Vizag Steel Plant*, г. *Visakhapatnam*, штат *Andhra Pradesh*, Индия, направленной на увеличение производства агломерата и снижение его себестоимости.

В рамках реконструкции выполнена комплексная модернизация агломашин АКМ-1 с заменой основного технологического оборудования, удлинения и уширения площади спекания.

Результатом реконструкции является существенное улучшение технико-экономических показателей работы агломашин. 31.10.2016 агломашин-1 была остановлена для выполнения работ по реконструкции, выполнен демонтаж подлежащего замене оборудования, выполнен ремонт и модификация опорной части агломашин. Монтаж более 2000 т нового оборудования выполнялся в условиях действующего производства, без остановки, установленной в том же здании агломашин-2.

По завершении монтажа и холодных испытаний линии в августе 2017 г. выполнена сушка футеровки зажигательного горна, проведены горячие испытания на различных режимах работы, с различными составами шихты и топливом различной калорийности, в декабре 2019 г. проведены гарантийные испытания комплекса. На всех режимах обеспечиваются эксплуатационные показатели лучше расчетных значений. На вторую половину 2020 г. запланирован останов агломашин АКМ-2 на реконструкцию. Данный опыт может быть применен при модернизации/реконструкции и других агломерационных и обжиговых конвейерных машин в России и в мире.

Таблица 3  
Технико-экономические показатели агломашин №№ 1 и 2 Vizag Steel Plant

№ п/п	Наименование показателя	Значение показателя для агломашин			
		№ 1		№ 2	
		До реконструкции	В настоящее время	В настоящее время	После реконструкции
1	Площадь спекания, м <sup>2</sup>	312	378	312	336
2	Ширина колосникового поля спекательной тележки, м	4,0	4,5	4,0	4,0
3	Производительность по годовому агломерату номинальная, т/сут	7970	11 040	7970	9200
4	Удельный расход газообразного топлива, ккал/т	36 000	18 000	36 000	20 000

В июне 2015 г. ПАО «Уралмашзавод» начал реализацию проекта новой аглофабрики производительностью 3,7 млн т/год агломерата для *Bokaro Steel Plant*, г. *Bokaro*, штат *Jharkhand*, Индия, с агломашинной АКМ-360, отвечающей всем современным требованиям в сфере агломерационного производства, в т. ч. отличающейся работой в высоком (700÷730 мм) слое шихты на машине и низким (до 15 000 ккал/т годового агломерата) удельным расходом теплоты газообразного топлива на зажигание при использовании горячего (~280 °С) воздуха от кольцевого охладителя агломерата в качестве окислителя. Уралмашем поставляются агломашинная АКМ-360, зажигательный горн, распределитель шихты челноковый и двухклапанные затворы.

Для подачи аглошихты от окомкователя к агломашине применяется челноковый распределитель шихты РШ-1,4×10. Предусмотрено частотное регулирование скорости движения ленты и хода распределителя в зависимости от производительности линии по шихте и для обеспечения равномерной укладки шихты по ширине бункера питателя. Лента оснащена системой мультискребков из полиуретана и карбида вольфрама для надежной ее очистки. Рейка распределителя выполнена выносной для предотвращения ее засыпания шихтой.

В питателе шихты установлены тензометрические датчики контроля уровня материала, секторные затворы для загрузки материала больше у бортов, частотно-регулируемый барабан питателя, шибера шихты с износостойким покрытием, гладилка для уплотнения верхней части слоя при зажигании. Питатель постели оснащен мотор-редуктором для возможности дистанционного регулирования высоты слоя постели.

Одной из инновационных разработок, примененных в питателе шихты, является использование магнитной сегрегационной плиты, представляющей собой систему магнитов, установленную под рабочей поверхностью шибера шихты. Система предназначена для предотвращения лавинообразного схода шихты при загрузке, сегрегацией материала по крупности, что обеспечивает уменьшение насыпной массы шихты, увеличение газопроницаемости слоя, что в свою очередь повышает скорость фильтрации воздуха, увеличение производительности агломашины и уменьшение расхода твердого топлива.

Для перемещения спекательных тележек устанавливается новый компактный привод ленты с комбинированным редуктором. Звездочки коренного вала и направляющие криволинейные оснащены сменными сегментами для уменьшения объема текущих ремонтов. В направляющих предусмотрены также откидные балки для обеспечения возможности съема/установки тележек в головной части агломашины.

Для зажигания шихты устанавливается малогабаритный зажигательный горн, отличающийся такими особенностями как:

- сводовое расположение газогорелочных устройств;
- длиннофакельные запальные устройства;
- комбинированная футеровка из теплоизоляционных блоков на основе ZrO и корундовых блоков;
- возможность работы на смешанном / коксовом газе в диапазоне теплотворной способности 1500÷2500 ккал/Нм<sup>3</sup>;
- наличие системы управления зажиганием.

Для уменьшения техногенной нагрузки агломашины предусматривается рециркуляция горячего воздуха из кольцевого охладителя, который после предварительной очистки в мультициклонах будет использоваться в качестве воздуха горения в зажигательном горне, что на 30–50 % снижает расход газа на зажигание, а часть горячего воздуха подается в укрытие рециркуляции для снижения расхода твердого топлива на спекание и предотвращения явления «шокового» охлаждения слоя после зажигательного горна.

Спекательные тележки – с литыми корпусами из чугуна с шаровидным графитом, предусмотрены подпружиненное уплотнение, теплоизолирующие накладки между колосниками и корпусом, глухие пластины в прибортовой зоне. Сами борта выполнены волнообразными, а также выполнены с «нахлестом» для уменьшения вредных прососов.

В разгрузочном устройстве устанавливаются звездочки, унифицированные с приводными. Разгрузочное устройство выполнено подвижным для компенсации удлинения ленты тележек. Предусмотрен гидропривод отвода разгрузочной части на период капитальных ремонтов. Приемная плита футерована штучными колосниками для обеспечения возможности селективной их замены по мере износа без демонтажа плиты в сборе.

Поскольку агломашина проектируется на номинальный удельный съем не менее 1,3 т/(м<sup>2</sup>×ч), предусматривается ее работа от двух параллельно работающих эксгаустеров с отдельными газовыми коллекторами. В связи с этим вакуум-камеры выполнены двухрукавными, исполнительные механизмы под зажигательным горном и на последних вакуум-камерах выполнены точнопозиционируемыми для регулирования разрежения под горном и управления точкой окончания спекания.

На коллекторах устанавливаются двухклапанные затворы усовершенствованной конструкции, с увеличенными геометрическими размерами конусов и износостойкой наплавкой контактных поверхностей.

В мае 2020 г. ПАО «Уралмашзавод» разработал основные технические решения (ОТР) для новой аглофабрики АО «ЕВРАЗ НТМК» производительностью 1,2 млн т/год. ОТР предусмотрена комплексная утилизация собственных металлургических отходов предприятия (отсев железорудного агломерата, пыли, шламы, шлаки металлургических производств, металлсодержащие компоненты и т. д.) с получением высококачественного железоблюса для использования в доменных печах. Предполагаемый комплекс аглофабрики включает в себя участки вагоноразмораживателя, вагоноопрокидывателя, холодный склад поступающего сырья, участки дробления и сортировки шлаков, флюсов и кокса, дозирования подготовленных компонентов шихты, смешивания, окомкования и спекания шихты, охлаждения, сортировки и отгрузки железоблюса. Предусматривается возможность производства в той же технологической цепочке наряду с железоблюсом также задувочного, марганцевого и других видов агломерата за счет периодических изменений соотношений между компонентами в составе шихты и технологических режимов работы оборудования.

Сегодня обжиговое и агломерационное оборудование ПАО «Уралмашзавод» является востребованным в России и в мире. ПАО «Уралмашзавод» предлагает свои передовые технические решения при создании современных экономичных Фабрик окомкования и аглофабрик любой производительности для условий каждого конкретного Заказчика.

#### Библиографический список

1. Лелеко, С. Н. Обжиговая машина пятого поколения / С. Н. Лелеко, Д. В. Банников, В. Д. Куроедов, М. Ю. Коновалов // Металлы Евразии. – 2012. – № 6. – С. 18–21.
2. Вяткин, А. А. Развитие и совершенствование технологии производства обжигового оборудования ОАО «Уралмашзавод» / А. А. Вяткин, Я. И. Калугин, М. Ю. Коновалов [и др.] // Сталь. – 2013. – № 9. – С. 5–6.
3. Кузнецов, А. Л. Передовые технические решения ПАО «Уралмашзавод» при создании новой фабрики окомкования ПАО «Михайловский ГОК» / А. Л. Кузнецов, А. А. Солодухин, В. В. Брагин [и др.] // Сталь. – 2017. – № 12. – С. 19–23.
4. Кузнецов, А. Л. Технологии и оборудование ПАО «Уралмашзавод» для фабрик окускования металлургического сырья в XXI веке / А. Л. Кузнецов, С. Ю. Смолин, К. В. Смирных [и др.] // Сталь. – 2018. – № 7. – С. 2–7.
5. Угаров, А. А. Оборудование ПАО «Уралмашзавод» для технологического комплекса обжиговой машины № 3 ПАО «Михайловский ГОК» / А. А. Угаров, А. В. Варичев, С. И. Кретов, А. Л. Кузнецов [и др.] // Добывающая промышленность. – 2018. – № 1. – С. 8–12.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ В ПРИКЛАДНОМ ПАКЕТЕ *RECURDYN*

Кряжев Юрий Анатольевич,

E-Mail: [kryazhev57@mail.ru](mailto:kryazhev57@mail.ru),

Горин Евгений Юрьевич,

E-Mail: [evgenijgorin@gmail.com](mailto:evgenijgorin@gmail.com),

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова,  
г. Барнаул

**Аннотация.** В современном машиностроении предъявляются высокие требования к точности получаемых размеров, к отклонениям формы, шероховатости и другим геометрическим параметрам качества поверхности изготавливаемых деталей машин и механизмов. Использование пакета прикладных программ *RecurDyn* позволило смоделировать динамическое состояние сборной торцевой фрезы в процессе резания стальной заготовки заданных размеров и физико-механических свойств и провести динамический анализ процесса резания для различных параметров режима торцевого фрезерования. Получены зависимости параметра шероховатости  $R_a$  от параметров режима резания  $V$ ,  $S$ ,  $t$ . Данные зависимости могут быть использованы в технологически ориентированном измерительном комплексе для диагностирования и прогнозирования параметров качества обработанной поверхности при фрезеровании на станках с ЧПУ.

**Ключевые слова.** Фреза, торцевое фрезерование, виброперемещения, демпфирующие элементы, имитационное моделирование, шероховатость.

### Экспериментальная работа

В работе рассматривается и решается данная задача за счет снижения вибрационных нагрузок на технологическую систему и поглощения энергии колебательного движения на примере торцевой фрезы и управления виброустойчивостью режущего инструмента путем изменения его демпфирующих свойств. С этой целью были проведены экспериментальные работы по записи и анализу сигнала акустической эмиссии на фрезерном станке ГФ-2171С3 с ЧПУ FMS 3000 при различных режимах фрезерования заготовки из легированной стали 18X12H10T торцевой фрезой с регулируемой жесткостью (рис. 1). Однако торцевое фрезерование сопровождается нестабильностью срезания припуска металла, которая связана с кинематикой и динамикой этого процесса обработки. В связи с этим, при торцевом фрезеровании возникают как вынужденные колебания, так и автоколебания, связанные с проявлением регенеративного эффекта. Динамика процесса торцевого фрезерования усложняется в результате действия случайных факторов, таких как: радиальное и осевое биение шпинделя станка, переменная жесткость технологической системы по длине обработки, случайные колебания физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов и т. д. Вибрации технологической системы, возникающие при фрезеровании, оказывают большое влияние на точность обработки и стойкость режущего инструмента. При появлении колебаний режущего инструмента относительно обработанной поверхности стойкость инструмента снижается пропорционально квадрату амплитуды и на заготовке возникают погрешности поперечного сечения, образуется волнистость и увеличивается шероховатость обработанной поверхности. При обработке резанием, для достижения заданной шероховатости поверхности необходимо обеспечить оптимальную жесткость системы станок – приспособление – инструмент – деталь, максимально исключить «воздействие» автоколебаний, вибраций, и других факторов. Следовательно, возникает необходимость управлять жесткостью технологической системы, тем самым обеспечивая заданную шероховатость обработанных поверхностей детали и снижая ударную нагрузку на режущий инструмент и как следствие, увеличение срока эксплуатации режущего инструмента.



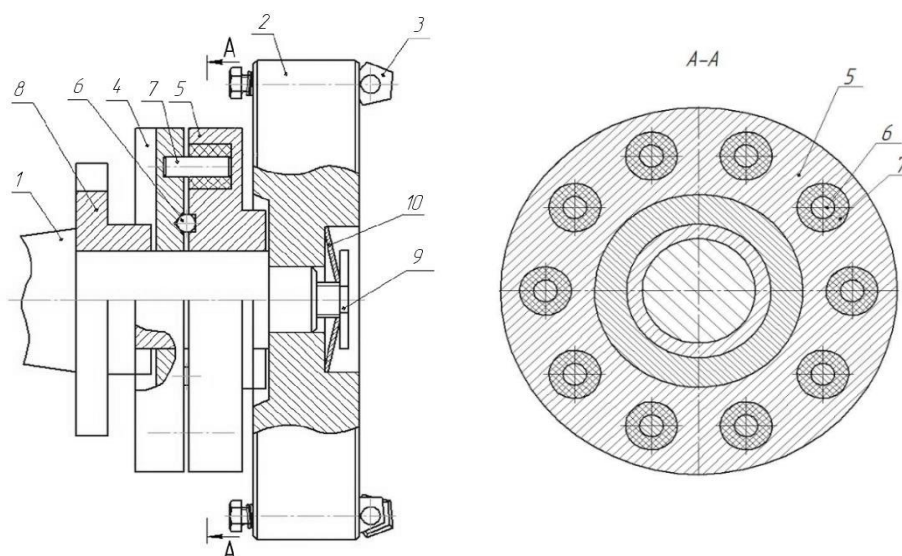


Рис. 1 Сборная торцовая фреза с демпфирующими элементами:  
 1 – оправка; 2 – фреза торцовая; 3 – режущие ножи; 4 – верхнее кольцо узла демпфирования;  
 5 – нижнее кольцо узла демпфирования; 6 – стальные шарики; 7 – штифт с резиновой вставкой  
 (демпфирующий элемент); 8 – поводок; 9 – винт; 10 – пружинная шайба

Нами была разработана конструкция торцовой фрезы, в которой для регулирования ее жесткости используются демпфирующие элементы, количество и материал которых может изменяться в зависимости от требуемых условий резания и значений собственной частоты режущего инструмента (получен патент на изобретение).

Главным преимуществом предлагаемого способа является его широкая универсальность и, как следствие, возможность его применения не только для фрез, но и для других видов режущего инструмента [1]. Демпфирующие элементы, регулирующие жесткость торцовой фрезы, можно подобрать по материалу и конструкции с учетом динамических характеристик технологической системы, что увеличивает эффективность его использования.

По окончании эксперимента проводилось измерение шероховатости обработанной поверхности заготовки на профилографе – профилометре «HOMMEL TESTER W55» (рис. 2).

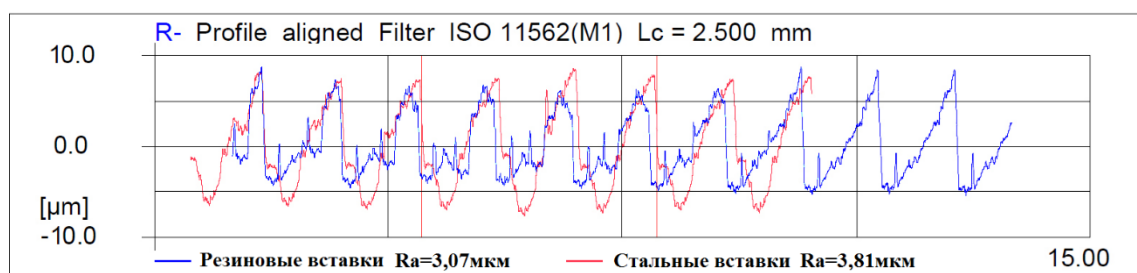


Рис. 2 Осциллограммы измерения на профилографе-профилометре «HOMMEL TESTER W55» шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности при фрезеровании сборной торцовой фрезой на режимах резания:  $t = 1$  мм,  $S_m = 0,1$  мм/зуб,  $V = 188,4$  м/мин

Для установления зависимости параметра шероховатости  $R_a$  от параметров режима торцового фрезерования ( $V$ ,  $S$ ,  $t$ ) был проведен плановый эксперимент типа ПЭФ 3<sup>2</sup> [1]. Уровни и интервалы варьируемых факторов были определены по предварительным исследованиям и литературным данным. Анализ результатов опытов позволил получить зависимости вида  $R_a = f(V, S, t)$  для торцового фрезерования торцовой фрезой с регулируемой жесткостью (с резиновыми и стальными вставками),

$Ra = 11,1271t^{-0,0985} * n^{-0,146} * S^{0,1}$  , мкм для стальных вставок и  
 $Ra = 0,1775t^{0,1105} * n^{0,2657} * S^{0,2}$  , мкм для резиновых вставок.

### **Имитационное моделирование процесса фрезерования в прикладном пакете *RecurDyn***

В работе также решалась задача компьютерного (имитационного) исследования конструктивных элементов разработанной торцовой фрезы с помощью прикладного пакета *RecurDyn*, который широко применяется для создания моделей различных механических систем, их анализа и оптимизации конструкции, использует идеологию визуального объектно-ориентированного программирования и компьютерное (имитационное) исследование объемных твердотельных моделей [2].

Процесс торцового фрезерования моделировался со следующими входными данными:  $D = 120$  мм – диаметр фрезы;  $z = 8$  – число зубьев;  $t = 1$  мм – глубина резания;  $B = 85$  мм – ширина резания;  $Sz = 0,1$  мм/зуб – подача;  $n = 500$  об/мин – частота вращения фрезы;  $v = 188,4$  м/мин – скорость фрезерования. В рамках проводимых имитационных исследований процесс резания моделировался с использованием демпфирующих элементов из резины (ХЛ 3.1) и стали (Ст45). Характеристики узла демпфирования сборной торцовой фрезы (входные параметры) – радиальная жесткость и демпфирование задавались в базе *Parametric Value List* (рис. 3). В дальнейших имитационных исследованиях предполагается ввести в модель характеристики шпиндельного узла станка с ЧПУ.

Имитационные исследования в блоке *Analisis* позволили смоделировать динамическое состояние сборной торцовой фрезы в процессе резания стальной заготовки заданных размеров и физико-механических свойств и провести динамический анализ для различных параметров режима фрезерования [1, 3]. При этом программное обеспечение *RecurDyn*, учитывая соединения между элементами, разрабатывает уравнения, связывающие реакцию со свойством материала, ограничением и нагрузкой. После этого программа *RecurDyn*, упорядочивая уравнения в большую систему совместных алгебраических уравнений, находит неизвестные.

Проведя имитационное исследование *Dynamic/Kinematic Analysis*, были получены графики виброперемещений по оси  $Z$  сборной торцовой фрезы при фрезеровании стальной заготовки с различными демпфирующими элементами. На рис. 4 показан пример сравнения величин виброперемещений по оси  $Z$  при торцовом фрезеровании для демпфирующих элементов торцовой фрезы из резины и стали.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 4, величина виброперемещений –  $u$  вдоль оси  $Z$  для фрезерования с демпфирующими элементами из стали, больше величины виброперемещений для фрезерования с демпфирующими элементами из резины на 20–30 % за время обработки. При этом процесс фрезерования с демпфирующими элементами из резины является стабильным, т. к. стабилен размах колебаний вдоль оси  $Z$ .

В работе А. Г. Сулова [4] рассматривается взаимосвязь качества поверхностного слоя деталей машин от условий механической обработки. Анализ результатов формирования шероховатости поверхности путем ее обработки различными методами позволяет сделать вывод, что, в основном, на шероховатость при использовании всех методов механической обработки оказывают влияние следующие факторы: 1) геометрия рабочей части инструмента (резца, зерна, шарика, ролика, алмазного индентора и т. п.) и кинематика его рабочего движения относительно обрабатываемой поверхности; 2) колебательные перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности; 3) упругие и пластические деформации обрабатываемого материала заготовки в зоне контакта с рабочим инструментом; 4) шероховатость рабочей части инструмента; 5) вырывы частиц обрабатываемого материала.

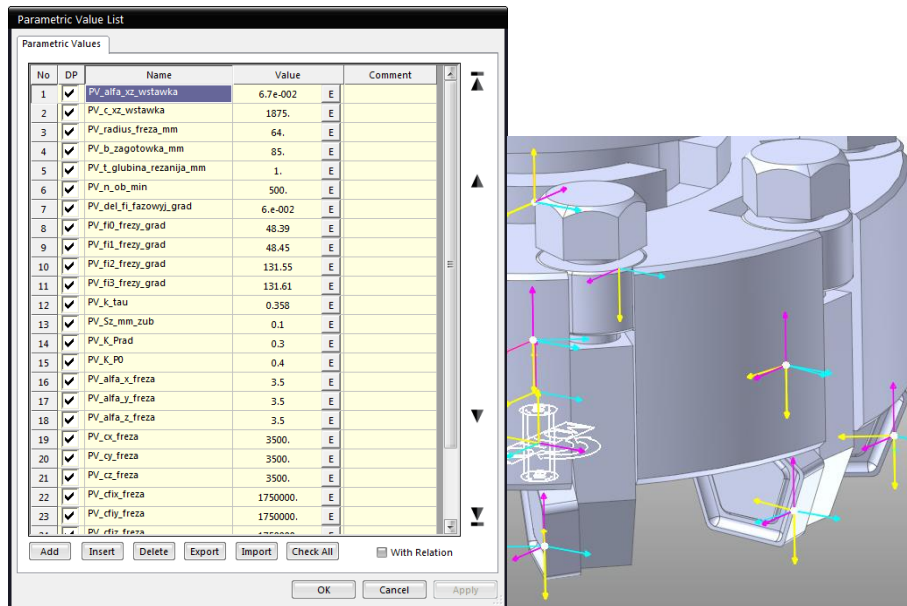


Рис. 3 Исходные параметры имитационного моделирования процесса фрезерования в *RecyrDun*

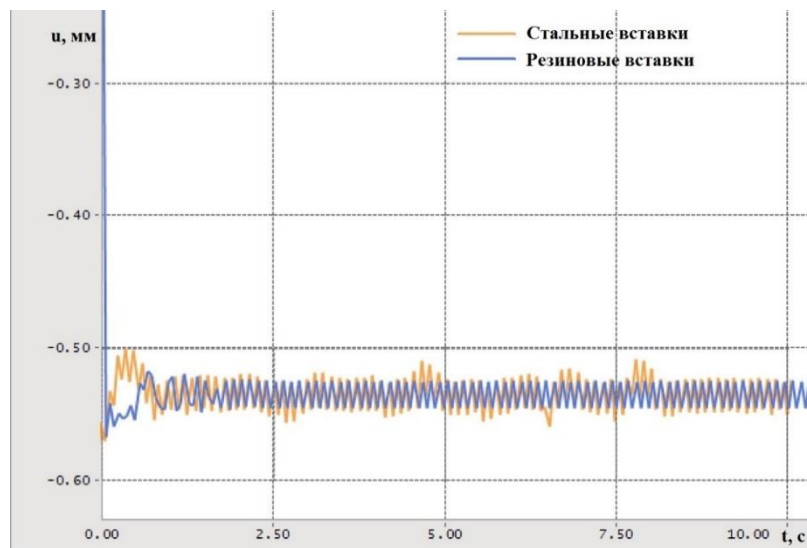


Рис. 4 Графика виброперемещений режущей кромки сборной торцевой фрезы с различными демпфирующими элементами

В зависимости от условий обработки степень влияния каждого из этих факторов на образование шероховатости поверхности будет различной. Анализ приведенных работ показывает, что если подобрать оптимальный уровень виброперемещений за счет регулирования жесткости системы инструмент – деталь, то возможно использовать процесс автоколебаний (виброперемещений), сопровождающий процесс торцевого фрезерования для уменьшения шероховатости обработанной поверхности. Оптимальный уровень автоколебаний (виброперемещений) процесса торцевого фрезерования позволит, за счет регулирования жесткости демпфирующих элементов торцевой фрезы, прерывать стружкообразование, а значит и пластическое течение обрабатываемого материала, путем кратковременного отрыва режущей кромки от поверхности резания.

Имитационное исследование показало, что данное явление, происходящее при торцевом фрезеровании инструментом с регулируемой жесткостью, позволяет снизить шероховатость обработанной поверхности до 25 %.

Уменьшение высоты микронеровностей обработанной поверхности и улучшение их формы за счет уменьшения интенсивности автоколебаний (виброперемещений), а значит и отклонений режущего инструмента технологическими средствами приводит к уменьшению шероховатости обрабатываемой поверхности детали [4].

Для установления зависимости параметра шероховатости  $Ra$  от параметров режима торцового фрезерования ( $V, S, t$ ) при имитационном моделировании также был проведен плановый эксперимент типа ПФЭ  $3^2$ . Уровни и интервалы варьируемых факторов аналогичны экспериментальным исследованиям, проведенным ранее. Анализ результатов имитационных исследований позволил получить зависимости вида  $Ra = f(V, S, t)$  для торцового фрезерования торцовой фрезой с регулируемой жесткостью (с резиновыми и стальными вставками).  $Ra = 0,0174t^{0,3504} * n^{0,217} * S^{0,6}$ , мкм для стальных вставок и  $Ra = 0,0008t^{0,4671} * n^{0,4377} * S^{0,8}$ , мкм для резиновых вставок.

### Выводы

Полученные результаты моделирования в *RecurDyn* коррелируют с результатами экспериментальной работы, проведенной ранее на фрезерном станке ГФ-2171С3. На исследуемых параметрах режимов резания значение шероховатости обработанной поверхности по параметру  $Ra$  уменьшилось на 24,2 % для сборной торцовой фрезы с демпфирующими элементами из резины в сравнении с шероховатостью обработанной поверхности, обработанной фрезой с демпфирующими элементами, изготовленными из стали.

Виброперемещения при имитационном моделировании в *RecurDyn* по стандартным отклонениям и размахам с погрешностью до 12 % соотносятся с шероховатостью обработанных поверхностей, полученных при экспериментальных исследованиях. Следовательно, в процессе торцового фрезерования фрезой с резиновыми демпфирующими элементами уменьшаются колебания режущего инструмента, которые снижают шероховатость обработанной поверхности в таком же соотношении, как и при имитационном моделировании в *RecurDyn*.

Полученные зависимости  $Ra = f(V, S, t)$  могут быть использованы в технологически ориентированном измерительном комплексе для диагностирования и прогнозирования параметров качества обработанной поверхности при фрезеровании на станках с ЧПУ.

### Библиографический список

1. Кряжев, Ю. А. Прогнозирование шероховатости при иглофрезеровании методом акустической эмиссии (статья) / Ю. А. Кряжев [и др.] // Вестник Алтайской науки. – № 2 – 1. – 2013. – С. 30–33.
2. Поддубный В. И., Разработка математических моделей механических систем с использованием прикладного пакета *RecurDyn* / В. И. Поддубный, М. Л. Поддубная // Ползуновский вестник, Барнаул. – 2015. – № 1. – С. 56–60.
3. *RecurDyn. Professional Mulyi-Body Dynamics Simulation Software.* [http://www.functionbay.org/phocadownload/Whats\\_new\\_V8/RecurDyn%20Brochure%202015.pdf](http://www.functionbay.org/phocadownload/Whats_new_V8/RecurDyn%20Brochure%202015.pdf) More references.
4. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – Москва : Машиностроение, 2000. – 320 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ТОКАРНОГО РЕЗЦА НА ОТВОД ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ

Либерман Яков Львович,

E-Mail: [yakov\\_liberman@list.ru](mailto:yakov_liberman@list.ru),

Лукинских Светлана Владимировна,

E-Mail: [swwl@mail.ru](mailto:swwl@mail.ru),

Смирнов Андрей Валерьевич,

E-Mail: [koda\\_box@mail.ru](mailto:koda_box@mail.ru),

Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** В настоящей работе выполнено исследование и разработка конструкции проходных резцов, обеспечивающих ускоренный отвод тепла из зоны резания при наружном точении. В качестве инструмента исследования использовались модули инженерного анализа *SolidWorks Simulation* и газо-гидродинамических расчетов *SolidWorks Flow Simulation*. Была создана базовая 3D модель сборного проходного резца и проведен термический анализ переходного процесса для определения во времени распределения температурных полей в теле резца при проведении процесса резания. Далее были внесены изменения в конструкцию резца, а именно, в корпусе державки выполнена полость, в которую был помещен медный сердечник, и проведены описанные выше исследования, которые показали, что при использовании медного сердечника температура в зоне резания в течение 15 мин со времени начала работы снижается на 246 °С. Для получения большего эффекта в медном сердечнике было выполнено отверстие и использовано воздушное охлаждение, что позволило снизить температуру в зоне резания на 313 °С.

**Ключевые слова.** Резание металлов, проходной резец, отвод тепла, термический анализ, распределение температурных полей, модель.

### Введение

Общеизвестно, что при резании металлов более 99 % механической энергии преобразуется в тепловую энергию, большая часть которой передается детали, резцу и стружке [1–5]. В многочисленных экспериментальных исследованиях различными группами ученых [1, 2, 6] было установлено, что наибольшее количество тепла – от 60 до 85 % переходит в стружку; в деталь переходит 25–35 %, в инструмент – 3–15 % и в окружающую среду – 1–2 %. Несмотря на то, что в резец передается небольшой процент тепловой энергии, абсолютное значение температуры на контактных площадках инструмента и в самом режущем клине значительно, и с ростом скорости резания может достигать 1000 °С и выше [1].

Высокая температура негативно сказывается на стойкости инструмента. Она может привести к повреждению и преждевременному износу твердосплавных пластин – появлению наростов на режущей кромке, деформации режущей кромки, выкрашиванию инструмента, сколов пластины и др. [6, 7].

Преждевременный износ сменной твердосплавной пластины влияет на точность обработки деталей и заготовок, может негативно сказаться на самом оборудовании.

Для эффективного резания необходимо поддерживать температуру в допустимых пределах, снижая тепловыделение и максимально отводя тепло из зоны резания.

Существуют различные способы снижения тепловыделения при резании.

Большое значение имеет выбор режимов резания. Известно, что с увеличением скорости резания генерируется больше тепла. Однако при этом за счет того, что образуется больше стружки в единицу времени, увеличивается отвод тепла со стружкой.

Увеличение подачи также благоприятно для отвода тепла за счет образования более толстой стружки.

Для отвода тепла из зоны резания широко используется смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ). Однако использование СОЖ сопряжено со значительными расходами, которые в большинстве случаев составляют 2–8 % от производственных расходов, т.е. их порядок соизмерим с затратами на инструмент [8]. Эти расходы связаны с необходимостью приобретения и утилизации СОЖ. Кроме того, высокая температура в зоне резания вызывает испарение охлаждающей жидкости, следствием чего являются скачки температуры. Сочетание скачков температуры и механического давления приводит к повреждению режущей кромки – вдоль рабочей поверхности образуются перпендикулярные трещины, при этом частички материала могут отпадать, провоцируя выкрашивание. С точки зрения экологичности СОЖ также имеет большие недостатки. Поскольку критическая температура компонентов СОЖ (130–200 °С) значительно ниже средней температуры в зоне резания, то в процессе резания они подвергаются термической деструкции. В результате этого в воздух рабочей зоны поступают вредные вещества, которые, при превышении нормативного их содержания в воздухе, оказывают негативное влияние на здоровье работников, вызывая профессиональные заболевания [9]. Отработанные СОЖ сбрасываются в сточные воды предприятия и являются основными загрязнителями воды, почвы. Стружка металлов после механообработки, загрязненная СОЖ, не всегда очищается и является также источником загрязнения [10]. Для нейтрализации отходов производства требуются дополнительные вложения.

Полностью отказаться от СОЖ при современном уровне развития не удастся. Например, в операции расточки, сверления и отрезки, когда затруднено удаление стружки или, когда при обработке производится измерение обрабатываемых поверхностей, требуется обильное охлаждение.

На современном уровне металлообработки проблема теплоотвода должна решаться не только путем подачи СОЖ в зону резания, но и созданием конструкций режущих инструментов, обеспечивающих ускоренный отвод тепла из зоны резания.

Представленная работа посвящена исследованию влияния теплопроводности резца на теплоотвод из зоны резания при наружном точении.

Повышение теплопроводности резца является актуальной задачей увеличения его срока службы. При возрастании теплопроводности улучшаются условия отвода тепла из зоны резания, что снижает температуру резания и повышает износостойкость инструмента.

#### **Методика исследования**

Решение поставленной задачи построено на моделировании процесса теплопередачи при резании в системе *SolidWorks Simulation*. Термический анализ в данной системе включает расчет как стационарного, так и нестационарного (переходного) теплового процесса. Исследование переходного процесса моделирует распространение тепловой энергии в зависимости от времени. Исходными данными при этом является термическая нагрузка, приложенная к телу.

Алгоритм проведения исследования следующий.

Создать модель базовой конструкции резца, которая будет являться прототипом для сравнения с последующими модернизированными конструкциями.

Задать области приложения и величину термической нагрузки, начальные и граничные условия.

Выполнить анализ теплопередачи в модели базовой конструкции резца и получить графики зависимости распространения тепловой энергии от времени.

Создать модели модернизированных конструкций и по описанной выше схеме получить для них графики, аналогичные вышеописанному графику.

На основании сравнения полученных результатов сделать выводы о целесообразности модернизации конструкции резца.

### *Исследование теплоотвода модели базовой конструкции*

В качестве базовой конструкции был сконструирован сборный проходной резец с поперечным сечением державки 32×35 мм, выполненной из стали 40X, углами  $\gamma = -6^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 6^\circ$ ,  $\varepsilon = 90^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\alpha_1 = 6^\circ$ ,  $\lambda = -6^\circ$ . Твердосплавная пластина – SNMG 190616, способ крепления пластины к державке – прижим сверху рычагом за отверстие (рис. 1).

Выполнение термического исследования резца в *SolidWorks Simulation* выполнялось с учетом временной зависимости в интервале 15 мин (900 с) – времени, соответствующему периоду стойкости сменной пластины, с временным инкрементом 1 с, т. е. процесс теплопередачи рассматривался как переходный.

Для проведения анализа были определены области действия сил, возникающих в процессе резания и вызывающих тепловую нагрузку на резец. К этим областям прикладывалась тепловая нагрузка в виде теплового потока мощностью 17 W в течение заданного диапазона времени. Для простоты исследования было принято, что конвективный теплообмен резца с окружающей воздушной средой происходит только на его заднем торце, поскольку боковые поверхности державки закрыты резцедержателем, в котором закрепляется инструмент. Коэффициент конвективной теплоотдачи 25 W/m<sup>2</sup>°K, температура окружающей среды 300 °K, начальная температура резца 20 °C.

При выполнении исследования определялись следующие параметры:

- распределение температуры по длине державки резца через 900 с после приложения нагрузки;
- изменение максимальной температуры резца в течение заданного диапазона времени.

Результат выполнения теплового расчета базовой конструкции резца представлен на рис. 1.

Из рисунка видно, что через 900 с максимальная температура установилась в вершине режущей кромки и составила 1035 °C. Остальная часть сменной пластины нагрелась до ~ 300–400 °C.

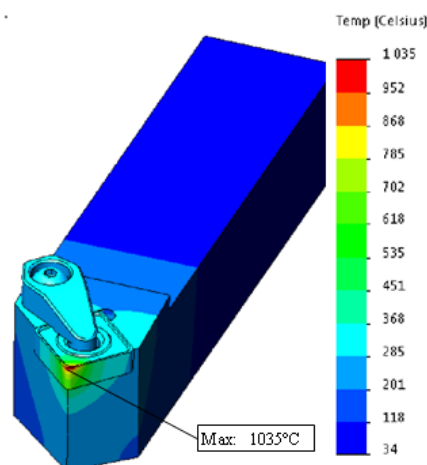


Рис. 1 Распределение температуры по длине державки в модели базовой конструкции резца через 900 с с момента приложения нагрузки

### *Разработка конструкций резцов с ускоренным отводом тепла из зоны резания*

Для исследования влияния конструкции резца на скорость отвода тепловой энергии из зоны резания были разработаны конструктивные варианты исходного резца, представленные на рис. 2.

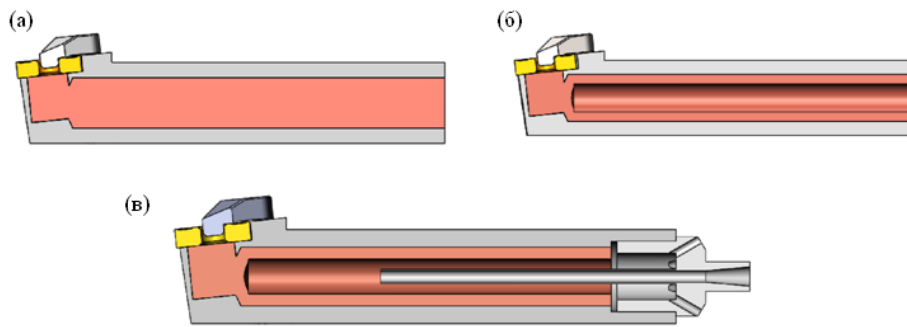


Рис. 2 Конструктивные варианты исходного резца (в разрезе):  
 (а) – с медным сердечником; (б) – с медным покрытием;  
 (в) – с принудительной воздушной конвекцией

В варианте конструкции с медным сердечником, представленном на рис. 2, а, в державке резца под режущей пластиной было выполнено отверстие, соединяющееся с продольным отверстием, и полученная полость заполнена медью.

На рис. 2, б показана модель резца с продольным отверстием, выполненным в медном сердечнике; при этом толщина медного слоя в державке резца составила 4 мм.

Дальнейшая модернизация конструкции резца, позволяющая увеличить теплоотвод, направлена на применение принудительной конвекции воздуха. С этой целью на задний торец резца с медным покрытием установили на резьбу крышку, к которой со стороны резца прикрепляется тонкая длинная трубка диаметром 5 мм, а с внешней стороны предусматривается штуцер для подачи сжатого воздуха. По периметру крышки выполнены отверстия для выхода нагретого воздуха (рис. 2, в).

#### *Исследование теплоотвода резцов разработанных конструкций*

Термический анализ моделей резцов, представленных на рис. 2, а, б, выполнялся в *SolidWorks Simulation* по тому же сценарию, что и анализ модели базовой конструкции, описанный ранее. Были приложены такие же термические нагрузки, заданы те же начальные и граничные условия и области действия сил, возникающих в процессе резания и вызывающих тепловую нагрузку на резец.

Результаты выполнения теплового расчета указанных резцов представлены на рис. 3.

Максимальная температура через 900 с воздействия на резец с медным сердечником теплового потока составила 789 °С (рис. 3, а). Это на 246 градусов меньше, чем в резце базовой конструкции. Теплоотвод резца с медным покрытием (рис. 3, б) по сравнению с резцом с медным сердечником не увеличился, а даже снизился, хотя и незначительно – на 9 градусов. Такой результат был заранее предсказуем, однако последний вариант позволяет использовать принудительную воздушную конвекцию для более существенного повышения теплоотвода.

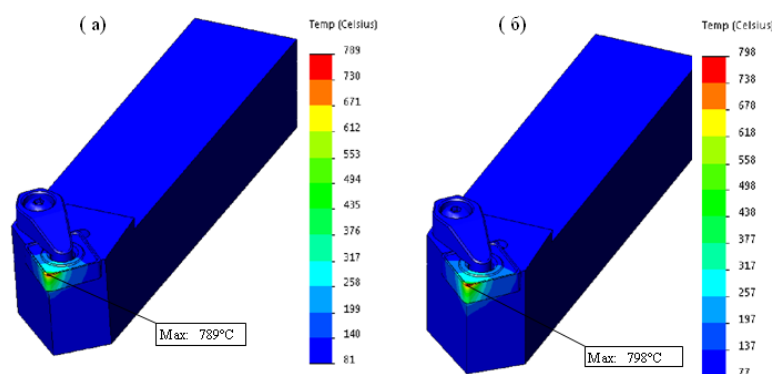


Рис. 3 Распределение температуры по длине державки через 900 с с момента приложения тепловой нагрузки: а – в модели резца с медным сердечником; б – в модели резца с медным покрытием



### *Исследование теплоотвода резца с принудительной воздушной конвекцией*

Анализ конструкции резца с охлаждением медного канала потоком сжатого воздуха выполнялся с использованием вычислительного инструмента *SolidWorks Flow Simulation*, предназначенного для моделирования потоков жидкости и газов. С помощью указанного приложения рассчитана траектория движения воздуха при подаче его через штуцер под давлением 0,6 МПа. Данные расчета из *SolidWorks Flow Simulation* были переданы в тепловой анализ, результаты которого представлены на рис. 4.

Согласно эпюре, представленной на рис. 4, максимальная температура резца составила 721 °С. По сравнению с базовым вариантом температура снизилась на 314 градусов.

### *Исследование изменения максимальной температуры резцов в процессе резания*

Для каждого из исследуемых резцов в интервале 900 с с временным инкрементом 1 с выполнялось определение температуры в вершине резца – точке, в которой наблюдалась максимальная температура через 900 с с момента приложения тепловой нагрузки. По результатам исследования построены графики изменения максимальной температуры резца в течение заданного диапазона времени (рис. 5).

Из представленных графиков следует, что температура в области режущей кромки значительно возрастает в течение первых 1–3 с, а в последующие 897 с изменяется менее интенсивно. Полученные результаты согласуются с многочисленными экспериментальными исследованиями, изложенными в литературе [1–4].

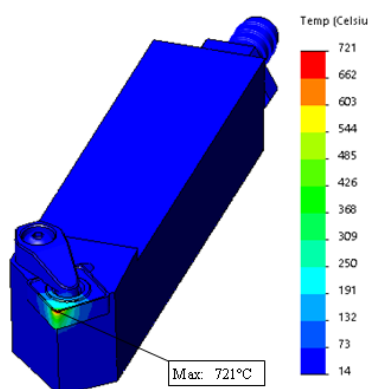


Рис. 4 Распределение температуры по длине державки в модели резца с принудительной воздушной конвекцией через 900 с с момента приложения тепловой нагрузки

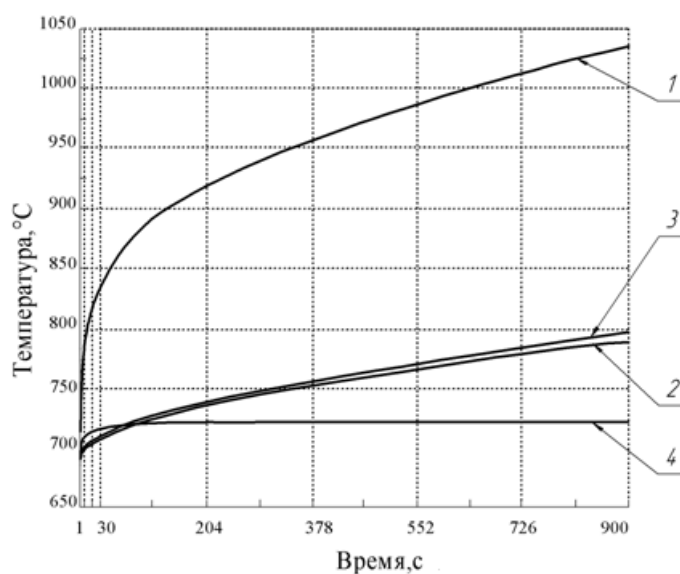


Рис. 5 Графики изменения максимальной температуры резцов в процессе резания:  
1 – модель базовой конструкции; 2 – модель с медным сердечником;  
3 – модель с медным покрытием; 4 – модель с воздушным охлаждением

## Заключение

Как показало исследование, конструктивные изменения, внесенные в базовый вариант токарного резца, в целом целесообразны. Однако они не все равноценны. Резец с медным сердечником с точки зрения теплоотвода достаточно рационален и прост. Он почти вдвое эффективнее базового резца, но применение в нем медного сердечника делает его существенно дороже. Стоимость резца с внутренним медным покрытием, очевидно, намного ниже, чем резца с медным сердечником. Теплоотвод от вершины резца он обеспечивает почти такой же, как резец с сердечником, но его жесткость будет меньше. Резец с воздушным охлаждением и медным внутренним покрытием по сравнению с базовым резцом обеспечивает наибольшее снижение температуры. Затраты же на его изготовление, по предварительным оценкам, будут раза в полтора выше, чем у базового варианта. Вместе с тем, жесткость его будет, по-видимому, такой же.

Учитывая изложенное, можно полагать, что резец с внутренним медным сердечником можно рекомендовать к использованию при ординарной токарной обработке заготовок из конструкционных сталей, когда задача повышения теплоотвода от вершины резца достаточно актуальна, но не критична. Резец с внутренним медным покрытием и воздушным охлаждением, вероятно, наиболее рационально использовать при высокоскоростной чистовой обработке. Резец с медным покрытием без воздушного охлаждения можно применять при среднескоростной обработке, когда скорость резания относительно высока, но не достигает весьма больших величин, свойственных высокоскоростному точению.

Проведенное исследование является лишь пилотным. В дальнейшем планируется его уточнение и расширение, что позволит разграничить более определенно области применения предложенных модификаций.

## Библиографический список

1. Грановский Г. И. Резание металлов : учебник / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва : Высш. шк., 1985. – 304 с.
2. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва : Машиностроение, 1975. – 344 с.
3. Ящерицын П. И. Основы резания материалов : учебное пособие / П. И. Ящерицын, В. Д. Ефремов. – Минск : БГАТУ, 2008. – 644 с.
4. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах: учебник / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – Москва : Машиностроение, 1990. – 288 с.
5. Справочник по обработке металлов резанием / Ф. Н. Абрамов, В. В. Коваленко, В. Е. Любимов [и др.]. – Киев : Техника, 1983. – 239 с.
6. Артамонов Е. В. Резание металлов и температурный фактор : учебное пособие / Е. В. Артамонов, Д. В. Васильев, М. Х. Утешев ; под общей ред. М. Х. Утешева. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2012. – 150 с.
7. Васин С. А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнер. – Москва : Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 448 с.
8. Васильев В. И. Резание металлов : в 2 ч. Ч. 1: учебное пособие / В. И. Васильев, А. В. Негодин. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 236 с.
9. Артемьева М. С. Воздействие тепловых явлений при обработке металлов резанием на смазочно-охлаждающие технологические средства / М. С. Артемьева // Безопасность жизнедеятельности. – 2015 – № 6(174). – С. 9–14.
10. Каменская А. А. Воздействие производств обработки металлов резанием машиностроительных предприятий на окружающую среду и способы снижения наносимого ущерба : аналит. обзор / А. А. Каменская, Р. И. Ковалова, В. М. Лабетский // ГПНТБ СО РАН ; Алт. политехн. ин-т. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 1992. – 102 с.

## МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТУЧИХ НОЖНИЦ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО ТИПА

Мугалимов Риф Гарифович,  
E-Mail: [energoseberegienie@rambler.ru](mailto:energoseberegienie@rambler.ru),

Боков Антон Иванович,  
E-Mail: [bokov\\_anton@mail.ru](mailto:bokov_anton@mail.ru),

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,  
Мугалимова Алия Рифовна,  
ООО Научно-исследовательское  
и опытно-конструкторское бюро «Энергосбережение»,  
г. Магнитогорск

**Аннотация.** Объектом исследования являются система автоматизированного управления мерным резом движением летучих ножниц профилигибочного агрегата. Цель работы: повышение качества профилированных изделий по их длине, уменьшение числа немерных заготовок, повышения пропускной способности агрегата путем модернизации системы автоматизированного управления мерным резом. В работе решается задача модернизации системы мерного реза с целью обеспечения заданной длины заготовок в статических и динамических режимах работы агрегата без замены силового электрооборудования летучих ножниц.

Показаны недостатки эксплуатируемых систем автоматизированного управления мерным резом движущейся стальной полосы летучими ножницами профилигибочного агрегата. Главный недостаток, разброс длин заготовок до 120 мм, обусловлен подачей сигнала для управления электроприводом ножниц с упреждением, неизменяющимся от скорости движения материала. Предложена концепция подачи и формирования управляющего сигнала в функции от скорости движения материала и учетом динамических характеристик электропривода ножниц. Экспериментально определены динамические характеристики электропривода. Разработана динамическая модель объекта исследования, позволяющая методами математического моделирования оценивать различные варианты исполнения систем управления мерным резом заготовок. Получена зависимость числа упреждающих импульсов датчика полосы на включение электропривода летучих ножниц в функции от скорости полосы. Для проверки реализуемости концепции создана опытно-промышленная автоматизированная система управления мерным резом на основе микропроцессора. Разработана программа для ЭВМ, ориентированная для управления летучими ножницами. Внедрение результатов исследований и разработок позволили уменьшить разброс длин заготовок до 12–15 мм, повысить пропускную способность агрегата до 6 %, экономить до 3 % стальной полосы. Разработки рекомендуются применять на профилигибочных агрегатах для мерного реза заготовок без замены или модернизации летучих ножниц и их электропривода.

**Ключевые слова.** Автоматизированная система, микропроцессор, программа для ЭВМ, профилигибочный агрегат, летучие ножницы, мерный рез, электропривод.

Известно множество дискретно-непрерывных технологий, в которых движущийся с определенной скоростью длинномерный материал разрезается летучими ножницами на заготовки одинаковой длины. Например, в металлургической промышленности на профилигибочных агрегатах (ПГА). На ПГА из рулонной стальной полосы с регламентированными размерами методом гнутья изготавливаются уголки, швеллеры, Z-профили и другие, или – профлисты с продольными и продольно-поперечными ребрами жесткости.

Одним из главных требований к продукции ПГА является ее качество, определяемое геометрическими размерами, в т. ч. по длине. Форма и геометрические размеры поперечного сечения гнутого профиля определяются размерами исходного материала, числом формовочных клеток и калибровкой их валков. Если перечисленные параметры в ходе технологического процесса практически не изменяются, то форма и геометрические размеры профиля тоже остаются неизменными. Однако длина готовых изделий зависит от точности реза летучими ножницами (ЛН) движущейся стальной полосы (П) на мерные заготовки. Точность реза определяется системой управления движением ЛН.

Непрерывная технология изготовления изделий на ПГА предусматривает автоматизированную укладку их в пачки готовой продукции. Попадание в пачки длинных или коротких изделий требует остановки ПГА и ручного извлечения немерных изделий из пачки. Это снижает производительность агрегата и увеличивает трудозатраты, что экономически не эффективно. Кроме того, изделия, не удовлетворяющие по длине техническому условию (ТУ), отправляются в брак, на переплавку, что также невыгодно производителю продукции. Поэтому решение проблемы реза летучими ножницами движущейся стальной полосы на мерные заготовки с минимальным разбросом по их длине является актуальной.

Точность и стабильность длин отрезанных заготовок при заданных кинематической схеме летучих ножниц (ЛН) и параметрах его электропривода (ЭП) определяются системой автоматизированного управления мерным резом (САУМР). Входными сигналами в систему являются сигналы с датчиков длины полосы (ДП), положение ножей ножниц (ДН) и выключателя конечного (ВК), контролирующего факт реза материала. Выходной сигнал САУМР включает электропривод ЛН.

Ряд исследований САУМР, применяемых в настоящее время на отечественных ПГА, показывает, что точность реза заготовок по длине низкая и не стабильная [1, 2]. Например, на ПГА 2-8×100-600 разброс длин заготовок при работе агрегата на установившейся скорости, изменяющаяся от 1,2 до 2,0 м/с в зависимости от профиля изделия, составляет от 40 до 120 мм. В режимах разгона и торможения ПГА разброс длин достигает 250–300 мм, что не удовлетворяет ТУ на профили. Это объясняется тем, что построение САУМР основано на концепции подачи управляющего сигнала на включение электропривода ЛН с некоторым упреждением до момента реза, независимым от скорости движения материала и динамических характеристик электропривода.

Объектом исследования данной работы является САУМР летучих ножниц ПГА с электроприводом постоянного тока, выполненного по системе «тиристор – двигатель» и аналоговой системой управления. Цель работы: повышение качества профилированных изделий по их длине, уменьшение числа немерных изделий, увеличение производительности ПГА путем модернизации САУМР без замены ножниц и его электропривода.

Структурная схема объекта исследования и СУЭП представлена на рис. 1. На рисунке: ЛН – летучие ножницы; П – полосовая сталь; ИР – измерительный ролик; ДП – датчик полосы, двухканальный инкрементальный энкодер; БВК – бесконтактный выключатель конечный; ТС – технологические сигналы; СБ – сигналы блокировок и безопасности; Я – якорь электродвигателя; ТП – тиристорный преобразователь; Ш – шунт; ТГ – тахогенератор; СОИ – система отображения информации;  $U_1$ ,  $U_2$  – источники питания; ПУО – панель управления оператора; ПЛК – промышленный логический контроллер.

В системе управления электроприводом сохранены задатчик интенсивности, контур регулирования тока с блоком ограничения тока, контур регулирования скорости. Задачи по синхронизации скорости ЛН и полосы, «ускоренного увода ножей из зоны реза», «позиционирование ЛН» в исходном положении «перенесены» в САУМР. Функционально САУМР состоит из двух частей: 1) контроллера движений, отвечающего

за решения задач управления приводом ЛН; 2) ПЛК, выполняющего расчет упреждения запуска электропривода ЛН, его коррекцию, контроль технологических и блокировочных сигналов, обработку сигналов ПУО, формирование сигналов для СОИ, поддержку сетевых протоколов связи с АСУ ТП.

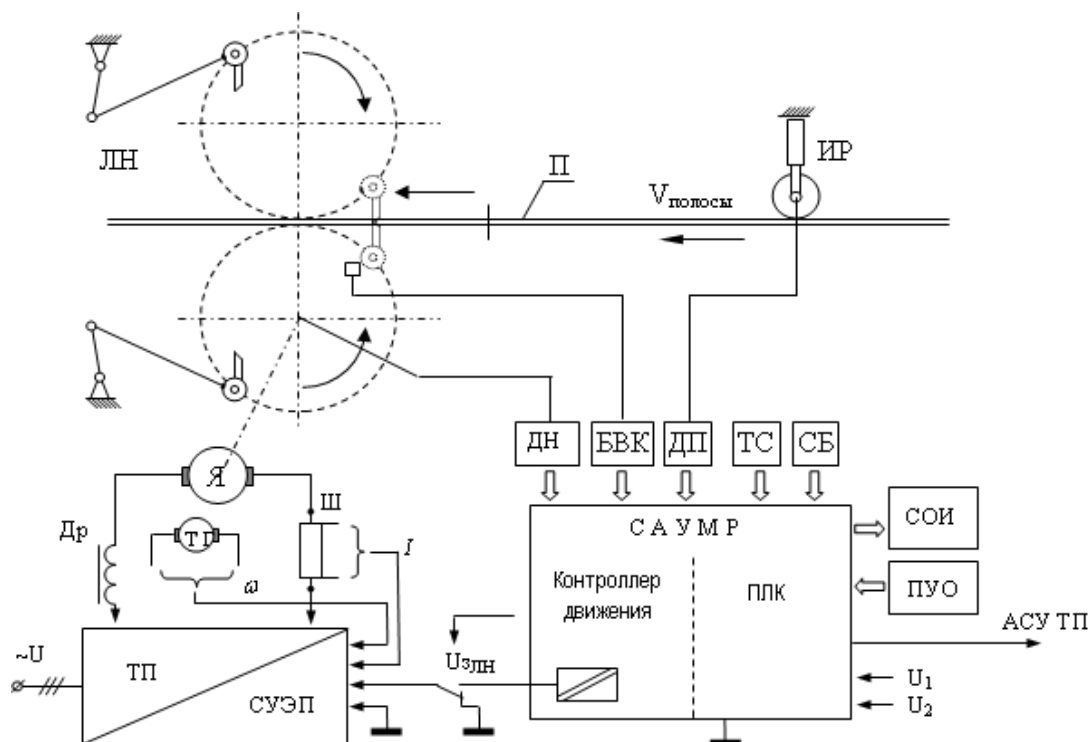


Рис. 1 Структурная схема объекта исследования и СУЭП

Известно, что решение, перечисленных выше, задач электропривода на типовом программируемом логическом контроллере (ПЛК) не обеспечивает нужного качества управления последним. Так как для решения задач электропривода типовое время цикла должно быть меньше 250 мкс, в то время как для большинства ПЛК время цикла выполнения программы составляет от 1 до 10 мс.

Возможны варианты реализации САУМР: 1) на контроллере движения (*Motion Controller*); 2) на выделенном специализированном контроллере (микроконтроллере) для решения задач электропривода и решения других задач на промышленном контроллере.

Для реализации концепции разработаны опытно-промышленный вариант САУМР, выполненный на микроконтроллере, и математическая динамическая модель объекта исследования – «летучие ножницы – электропривод – полоса – САУМР» (ЛН-ЭП-П-САУМР), содержащая submodule: собственно ЛН-ЭП; инкрементальные датчики ДП, ДН; движущаяся полоса П; САУМР на микроконтроллере. Перечисленные submodule реализованы средствами пакета прикладных программ *Simulink* системы *MathLab*. Оптимизация параметров submodule ЛН-ЭП, идентификация модели и объекта исследования выполнены средствами пакета *Nonlinear Control Design Blockset*.

В отличие от эксплуатируемых систем управления модернизация САУМР основана на концепции формирования и подачи управляющего сигнала в СУЭП летучих ножниц в функции от скорости полосы при неизменном базовом расстоянии от измерительного ролика ДП до линии реза ЛН и динамических характеристик ЭП.

Методом моделирования и инструментального исследования объекта определены:

1) динамические характеристики ЭП – зависимость частоты вращения электропривода от ступенчатых сигналов управления  $U_3$ , пропорциональных скорости полосы,  $\omega(t) = f(V_{II})$ , на интервале времени от момента подачи сигнала  $U_3$  до момента реза, рис. 2 [3];

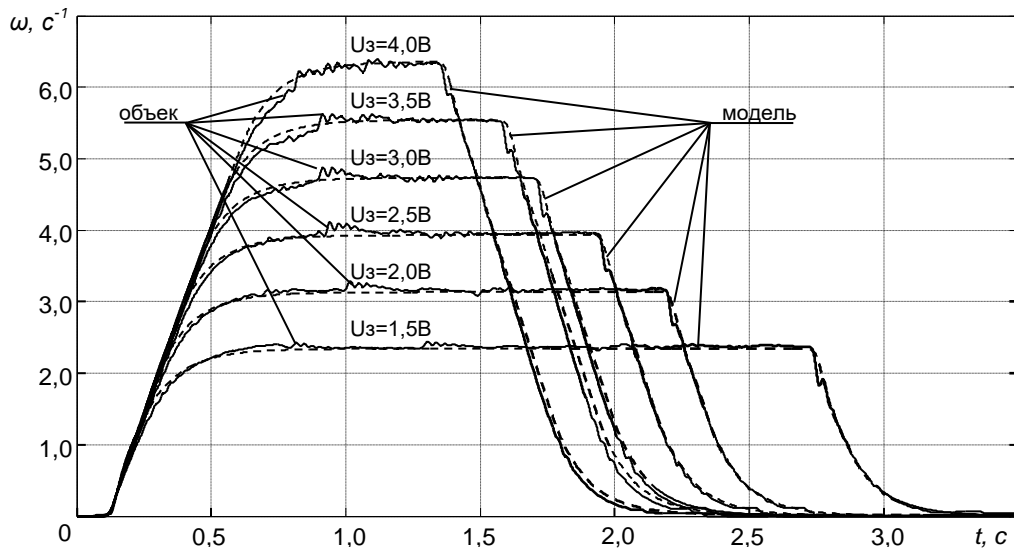


Рис. 2 Зависимость частоты вращения электропривода от ступенчатых сигналов управления  $U_3$

2) зависимость числа упреждающих импульсов датчика полосы ( $N_{удп}$ ) от скорости движения полосы ( $V_{п}$ ). Полученная зависимость аппроксимирована полиномом второй степени:  $N_{удп} = 126,17 \cdot V_{п}^2 + 40,392 \cdot V_{п} + 78,731$ .

Опытно-промышленный вариант САУМР реализован на микропроцессорном модуле E14-440M. Функциональная схема управляющей программы САУМР и программа для ЭВМ, реализующая алгоритм управления, опубликованы в [4–6].

Внедрение опытно-промышленного варианта САУМР, реализующего концепцию формирования и подачи управляющего сигнала в СУЭП летучих ножниц в функции от скорости полосы и динамических характеристик ЭП, при неизменном базовом расстоянии от измерительного ролика ДП до линии реза, позволило повысить точность мерного реза и уменьшить разброс длин заготовок. На рис. 3 представлен фрагмент гистограммы длин заготовок профиля  $100 \times 88 \times 77 \times 20 \times 5$ ,  $L = 10880 + d$  мм, где  $d = 80$  мм – допуск по ТУ, раскroенных при скорости полосы 2,0 м/с применением опытно-промышленной САУМР.

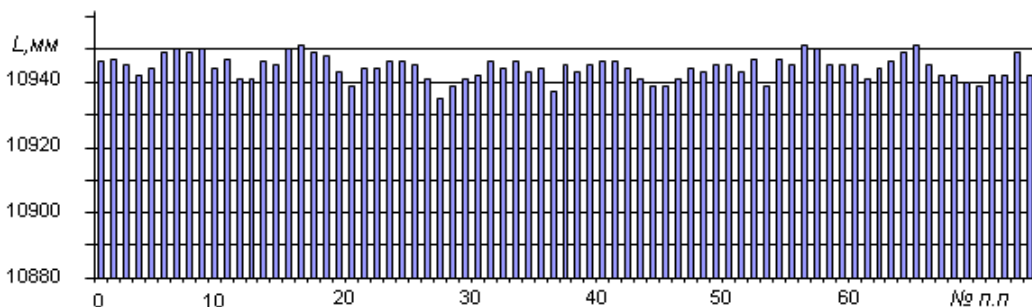


Рис. 3 Гистограмма длин заготовок профиля  $100 \times 88 \times 77 \times 20 \times 5$  при скорости полосы 2,0 м/с, раскroенных на опытно-промышленной САУМР

Анализ гистограммы длин раскroенных заготовок показывает, что максимальный разброс длин заготовок при использовании САУМР на основе микроконтроллера не превышает 16 мм в статических и динамических режимах работы ПГА, что в 2,5–7,5 раза меньше, чем в эксплуатируемых САУМР.

Анализ экономических показателей работы ПГА с модернизированной САУМР позволяет: 1) повысить точность реза и снизить разброс длин заготовок, позволяющие производителю продукции уменьшить допуски на длину заготовок по ТУ в 1,5–2,0 раза;

2) экономить металл за счет повышения точности реза и уменьшения числа немерных заготовок до 3,2 %; 3) повысить производительность ПГА до 6 %.

## Заключение

1. Эксплуатируемые САУМР не обеспечивают заданные точности реза в статических и динамических режимах работы ПГА и требуют модернизации.

2. Разработана динамическая модель объекта исследования – «летучие ножницы – электропривод – полоса – САУМР», позволяющая методами математического моделирования оценивать различные варианты исполнения систем управления мерным резом заготовок.

3. Получена зависимость числа упреждающих импульсов датчика полосы, позволяющая определять момент включения электропривода ЛН в функции от скорости полосы при синхронизации линейных скоростей полосы и ножей летучих ножниц в момент реза и обеспечения длин отрезанных заготовок, удовлетворяющих ТУ.

4. Разработано проблемно-ориентированное программное обеспечение САУМР, реализованное на микроконтроллере, обеспечивающее реализацию концепции формирования и подачи управляющего сигнала в СУЭП летучих ножниц в функции от скорости полосы и учетом динамических параметров электропривода.

5. Результаты исследований и разработки рекомендуются применять на профилегибочных агрегатах для мерного реза заготовок без замены или модернизации летучих ножниц и их электропривода.

## Библиографический список

1. Исследования и разработка системы управления точностью раскроя периодического профиля на стане 1-5×300×1500 ЛПЦ-7. Отчет по НИР /МГТУ Г.Р. № 01200613107, инв. № 03200701405, Магнитогорск, ГОУ ВПО «МГТУ», 2009. ФГАИУ «ЦИТиС», лиц. № 12737Н. – 98 с.

2. Разработка и исследования системы управления летучими ножницами профилегибочного агрегата 2-8×100-600 ЛПЦ 8 с целью повышения точности раскроя. Отчет по НИР /МГТУ Г.Р. № 01201001055, инв. № 03201153098, Магнитогорск, ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. ФГАИУ «ЦИТиС», лиц. № 12737Н.

3. Динамическая модель агрегата «летучие ножницы» стана 2-8×100-600 ЛПЦ-8 ОАО «ММК» / С. М. Андреев, А. И. Боков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2015. – Т. 2. – С. 102–105.

4. Система управления электроприводом летучих ножниц профилегибочного агрегата на базе микропроцессорного модуля E440 ФИРМЫ «L-CARD» / Р. Г. Мугалимов, А. И. Боков, А. Р. Мугалимова, В. В. Серков // Электротехнические системы и комплексы. – 2011. – № 19. – С. 31–37.

5. Программный комплекс для иерархической автоматизированной системы управления электроприводом летучих ножниц / Р. Г. Мугалимов, А. И. Боков, А. Р. Мугалимова // Свидетельство о гос. рег. программ для ЭВМ РФ № 20130614457; правообладатель ООО «МГТУ Энергосбережение+»; реестр программ для ЭВМ от 13.05.2013 г.

6. Микропроцессорная система управления летучими ножницами профилегибочного агрегата / Р. Г. Мугалимов, А. И. Боков, А. Р. Мугалимова // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования : Материалы 7-й междунар. науч.-тех. конф. – Вологда : ВоГТУ, 2012. – С. 246–249.

# ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОВЫШЕНИЕМ ИХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОРЕМОНТНЫХ ЦЕХОВ И УЧАСТКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Мугалимов Риф Гарифович,  
Закирова Регина Артуровна,

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,

Мугалимова Алия Рифовна,

E-Mail: [energoberegenie@rambler.ru](mailto:energoberegenie@rambler.ru),

ООО Научно-исследовательское и опытно-конструкторское

бюро «Энергосбережение»,

г. Магнитогорск

**Аннотация.** Показано, что главным недостатком традиционных асинхронных двигателей является сравнительно низкий коэффициент мощности. Для повышения энергоэффективности асинхронных электроприводов предлагается новая технология их модернизации при капитальном ремонте. Отличительным признаком предлагаемого капитального ремонта является пересчет статорной обмотки с учетом реального состояния стали статора. Модернизация двигателя осуществляется двумя трехфазными обмотками. Одна из обмоток предназначена для включения на источник питания. Другая обмотка предназначена для включения на трехфазный конденсатор, параметры которого определяются с учетом степени компенсации реактивной мощности двигателя. В предлагаемом варианте двигателя используются явление феррорезонанса токов в электромагнитной системе машины. Это позволяет создать асинхронный двигатель с желаемым коэффициентом мощности, в том числе равным единице, что повышает его энергоэффективность. Капитальный ремонт с повышением класса энергоэффективности асинхронных двигателей позволяет повысить КПД и уменьшить потери активной мощности на 3–7 % в системе электропривода и в системе электроснабжения. Моделированием и практикой показано, что дополнительные затраты на модернизацию составляют 23–30 % от затрат на традиционный капитальный ремонт. Дополнительные затраты на модернизацию окупаются за 0,25–0,8 года экономией электрической энергии. Результаты разработки и исследований рекомендуются энергетикам предприятий, специалистам по ремонту электрических машин, а также центром энергосбережения.

**Ключевые слова.** Асинхронный двигатель, технология, ремонт, модернизация, технологические операции, энергоэффективность.

На промышленных предприятиях РФ до 80 % электроприводов рабочих машин и механизмов выполнены на основе традиционных асинхронных двигателей (ТАД). Это обусловлено их высокой надежностью и малыми эксплуатационными расходами. Однако энергоэффективность ТАД сравнительно невысокая. В зависимости от мощности, частоты вращения ротора номинальные КПД и  $\cos\varphi$  находятся в диапазоне: КПД = 65–93 %,  $\cos\varphi = 0,7–0,9$  [1]. Меньшие цифры относятся к двигателям малой мощности. Их энергетический КПД, равный произведению электрического КПД и коэффициента мощности, находится в диапазоне 46–84 %, т. е. от 16 до 54 % потребляемой электрической энергии рассеивается в окружающей среде. Непосредственно в ТАД теряется от 7 до 35 % энергии, в силовых цепях электропривода и системе электроснабжения – от 9 до 19 %.

Низкий энергетический КПД обусловлен тем, что ТАД потребляет реактивную мощность (реактивный ток), которая в другие виды энергии не преобразуется. Реактивный ток, протекая в силовых цепях электропривода и системы электроснабжения, создает потери активной мощности. Чем меньше  $\cos\varphi$ , тем больше потери активной мощности,



тем ниже КПД электротехнического комплекса. Теоретическими и экспериментальными исследованиями, а также практикой доказано, что из-за сравнительно низкого  $\cos\varphi$  в электротехнических комплексах теряется до 4,5–6,0 % электрической энергии. От реактивного тока потери электрической энергии предприятий РФ оцениваются величиной не менее 31,5 миллиарда кВт/час. Поэтому проблема повышения энергоэффективности электротехнических комплексов является актуальной.

Международный стандарт IEC60034-30 определяет энергоэффективность асинхронных двигателей тремя уровнями классов энергоэффективности: *IE1* – низкий класс; *IE2* – средний класс; *IE3* – высокий класс. В странах Европейского Союза Евродирективы, например, *COMMISSION REGULATION (EU) 2019/1781* запрещают применение моторов определенного класса энергоэффективности. Европейские производители асинхронных двигателей повышают их класс энергоэффективности путем увеличения массы активных материалов – электротехнической стали, обмоточной меди, алюминия в среднем на 20–25 %, что дает повышение КПД на 1,5–3,5 %. При этом существенно увеличивается стоимость энергоэффективной электрической машины. В Российской Федерации большинство общепромышленных асинхронных двигателей напряжением до 1000 В, мощностью до 100 кВт, изготовленных до 2010 г., имеют низкий класс энергоэффективности *IE1*. После традиционного капитального ремонта энергоэффективность асинхронных двигателей, как показывает опыт эксплуатации, становится еще ниже. Закон Российской Федерации «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» № 197-ФЗ от 11.07.2011, № 200-ФЗ от 18.07.2011 № 242-ФЗ с 2017 г. запрещает изготовление и использование асинхронных двигателей низкого класса энергоэффективности.

Доказано, что самым оптимальным вариантом уменьшения потерь активной мощности в электротехнических комплексах напряжением до 1000 В является полная компенсация реактивной мощности каждого электропотребителя [2].

Жизненный цикл ТАД не превышает 25 лет. Двигатель за этот период от 3-х до 7-ми раз проходит капитальный ремонт из-за разрушения обмотки статора. Капитальный ремонт, как правило, осуществляется путем замены поврежденной обмотки статора по заводским обмоточным данным. Капитальный ремонт может сопровождаться модернизацией двигателя с изменениями номинального напряжения и частоты вращения ротора. После каждого капремонта или модернизации ТАД в условиях электроремонтного цеха предприятия, как правило, снижается его энергоэффективность до 0,5–1,0 % [3–5]. В связи с изложенным, существует проблема совершенствования технологий изготовления новых энергоэффективных и капитального ремонта существующих асинхронных двигателей с повышением их класса энергоэффективности.

В данной работе предлагается новая технологическая схема капитального ремонта асинхронных двигателей, позволяющая повысить класс энергоэффективности путем модернизации электромагнитной схемы статора [3]. Сущность модернизации заключается в совершенствовании электромагнитной схемы статора по изобретению [6]. Совершенствование электромагнитной схемы предполагает замену одной трехфазной обмотки статора на две трехфазные обмотки при сохранении прежнего объема активных материалов – веса меди и магнитной системы машины. Одна из трехфазных обмоток называется рабочей. Она включается по обычным схемам («звезда» или «треугольник») на трехфазный источник питания. Другая трехфазная обмотка называется компенсационной. Эта обмотка включается на трехфазный конденсатор определенной емкости, соединенный в схему «звезда» или «треугольник». Параметры обмоток и конденсатора определяются с учетом реального состояния магнитной системы двигателя и достижения его коэффициента мощности единице ( $\cos\varphi = 1$ ) при сохранении или некоторого повышения прежнего значения КПД. Конструкция ротора, его параметры остаются прежними. При модернизации асинхронного двигателя рабочая и компенсационная обмотки статора изготавливаются и укладываются в пазы магнитной системы статора по известной

технологии. Оптимальные электрические схемы соединения обмоток друг с другом и компенсирующим конденсатором уточняются при инструментальном испытании модернизированного двигателя. Модернизированный двигатель в дальнейшем назовем энергоэффективный асинхронный двигатель (ЭАД) с индивидуальной компенсацией реактивной мощности. Технологическая схема ремонта и модернизации ТАД в ЭАД опубликована [3].

Капитальный ремонт и модернизация асинхронных двигателей требует определенных трудовых и материальных затрат. В настоящее время большинство электроремонтных предприятий определяют эти затраты из опыта предыдущих ремонтов с учетом номинальных мощности, напряжения, частоты вращения двигателя, также применением различных коэффициентов, учитывающих страну производителя, срочность ремонта, вариант исполнения двигателя и др. Такой подход к оценке затрат на капитальный ремонт обусловлен отсутствием эффективных математических моделей, алгоритмов и программ для ЭВМ, позволяющих детально рассчитывать все виды затрат с учетом квалификации специалистов, осуществляющих ремонт, цены и объемов материальных ресурсов, необходимых для ремонта конкретного двигателя, срочности ремонта и других факторов. Для оценки экономической целесообразности модернизации ТАД в ЭАД разработаны методика и компьютерная программа для ЭВМ, опубликованные в [7, 8].

Пересчет на ЭВМ обмоточных параметров ТАД на параметры ЭАД осуществляется по результатам экспериментального исследования стали статора. Испытание ферромагнитного сердечника статора производится индукционным методом на двигателе с вынутым (извлеченным из расточки статора) ротором. Для намагничивания сердечника статора ее спинка охватывается экспериментальной намагничивающей катушкой с небольшим числом витков  $W_1 = 3 \div 5$  изолированным гибким проводом. На намагничивающую катушку подается эталонное напряжение, задается эталонный ток намагничивания.

При заданных величинах эталонных напряжения и тока намагничивания ваттметром измеряются потери активной мощности в стали статора, регистрируются осциллограммы электрических величин. Полученные осциллограммы напряжения и тока намагничивания анализируются, определяется сдвиг фаз напряжения и тока, оцениваются не синусоидальность тока и удельные потери мощности в стали статора.

Модернизация ТАД в ЭАД в условиях электроремонтных цехов и участков позволяет повысить энергоэффективность электротехнических комплексов, использующих асинхронные двигатели, на 3–7 %. Дополнительные затраты на модернизацию с повышением класса энергоэффективности окупаются за 0,25–0,8 года экономией электрической энергии [9].

Результаты разработки и исследований рекомендуются энергетикам предприятий, специалистам по ремонту электрических машин, а также центром энергосбережения.

#### Библиографический список

1. Асинхронные двигатели серии 4А : Справочник / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 504 с.
2. Вагин, Г. Я. О необходимости корректирования методики компенсации реактивной мощности в электрических сетях напряжением до 1000 В / Г. Я. Вагин, С. Н. Юртаев // Промышленная энергетика. – 2008. – № 5. – С. 31–40.
3. Мугалимов, Р. Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе : монография / Р. Г. Мугалимов. – Изд-во Магнитогорск. гос. ун-та им. Г. И. Носова, 2011. – 250 с.
4. Kaddari, M. Evaluation of energy savings by using high efficiency motors in a thermal power station / Mohamed Kaddari, Mahmoud El Mouden, Abdelwahed Hajjaji // International Journal of Green Energy Volume 14. – 2017. – Issue 10.

5. EMT. 2016. EASA. The effect of repair rewinding on motor efficiency, rewind study and good practice guide to maintain motor efficiency. In website of IECEx SYSTEM. www.iecex.com (accessed March 22, 2016).

6. Пат. 2112307 RU, МКИ 6 Н02 к 17/28. Асинхронная компенсированная электрическая машина / Р. Г. Мугалимов, А. Л. Савицкий, Л. Д. Савицкая // Открытия. Изобретения. – 1998 г. – № 15.

7. Мугалимов, Р. Г. Энергоэффективные асинхронные двигатели, технико-экономические преимущества и оптимизация их создания / Р. Г. Мугалимов, Р. А. Закирова, А. Р. Мугалимова // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 2 (31). – С. 30–34.

8. Мугалимов Р. Г., Закирова Р. А., Мугалимова А. Р. Программный комплекс для расчета и оптимизации себестоимости традиционного капитального ремонта и ремонта с повышением класса энергоэффективности асинхронных электродвигателей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610278, зарегистрирован в Реестре программ для ЭВМ 11.01.2016 г.

9. Мугалимов Р. Г. Техничко-экономическое обоснование целесообразности капитального ремонта асинхронных двигателей с повышением их класса энергоэффективности / Р. Г. Мугалимов, И. И. Баранкова, Р. А. Закирова, А. Р. Мугалимова [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2017. – № 2. – С. 101–109.

## **КОРПОРАТИВНАЯ КУЛЬТУРА КАК ОДИН ИЗ ГЛАВНЫХ ФАКТОРОВ ЭФФЕКТИВНОГО РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

**Путилова Евгения Анатольевна,**

E-Mail: eazhiltsova@mail.ru,

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ,

**Шуталева Анна Владимировна,**

E-Mail: a.v.shutaleva@urfu.ru,

Уральский федеральный университет,

г. Екатеринбург

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию влияния корпоративной культуры на развитие промышленного предприятия. Показано, что формирование принципов корпоративной культуры способствует повышению уровня вовлеченности сотрудников, результативности их трудовой деятельности, сохранению и воспроизводству человеческого капитала предприятия. Развитие корпоративной культуры, включающей в себя направленность на повышение уровня знаний, инновативности и организации, позволяет увеличить производительность и эффективность работы всей организации, а также регулировать внутренние трудовые отношения, предотвращая и предупреждая кризисные ситуации.

**Ключевые слова.** Корпоративная культура, человеческий капитал, промышленное предприятие, социальная идентификация.

В современном мире корпоративная культура становится одним из значимых факторов существования и развития промышленного предприятия. Вопросы формирования корпоративной культуры затрагивают сферы экономики [1], социальной идентичности [2–4] этики бизнеса и производства [5], управления [6, 7] и другие сферы

человеческого бытия. В условиях экономического кризиса, который объективно затрагивает все сферы деятельности человека, роль корпоративной культуры на предприятиях неизменно увеличивается.

Мировой кризис приводит к изменению конъюнктуры рынка всей промышленности, что формирует необходимость поиска новых задач, целей, стратегий [8, 9]. Э. Фишер обозначает этический поворот, который произошел в сфере бизнеса и производства [10], указывая на то, что новые направления действий для обеспечения социально справедливого и экологически устойчивого развития общества связаны с формированием корпоративной этики. Этический поворот проявляется в связи с воздействием глобализации производства и торговли на процесс развития общества. М. Зак и его коллеги предложили оценивать эффективность работы организации с использованием пяти измерений (инновации, темпы разработки новых продуктов, удовлетворенность клиентов, удержание клиентов и эксплуатационные расходы) [11].

С. Бриксон обращается к вопросам социальной идентичности и показывает, что социальная идентификация зависит от того, как человек воспринимает собственное единство с группой лиц [12]. Особая роль в формировании корпоративной культуры принадлежит организации профессиональной деятельности, досуга и праздников сотрудниками предприятия [13]. Так корпоративная культура воплощает идентичность, стереотипное представление человека о себе и других. Особенности социальной идентификации отражены в корпоративной культуре, которая накладывает отпечаток на организации социализации, межгрупповые отношения и конфликты.

Основанием повышения эффективности предприятия посредством формирования корпоративной культуры является человеческий капитал. Именно он повышает результативность деятельности, являясь одним из конкурентных преимуществ предприятия в экономической и социальной сферах. Наиболее значимая составляющая человеческого капитала – интеллектуальный капитал, поскольку он является суммой компетенций, знаний, креативности, преданности и опыта сотрудников предприятия. Человеческий капитал включает в себя ценности, установки и способ взаимодействия людей в организации, в котором тип лидерства и руководства мотивирует людей к проявлению своего потенциала в организации [14]. Человеческий капитал одной организации отличается от человеческого капитала другой организации, что дает ему характеристики неповторимости, редкости и несменяемости [15].

Корпоративная культура имеет дело с человеческими, информационными, материальными, технологическими ресурсами и возможностями, которые влияют на производительность и длительное конкурентное преимущество предприятий. Дж. Коттер и Дж. Хескетт доказали прямую связь между результатами предприятий и силой их корпоративных культур [16]. Современные промышленные предприятия приходят к необходимости приобщения сотрудников к корпоративной культуре, к их вовлеченности, что ведет к изменению взгляда на персонал в целом. В последние годы все больше промышленных предприятий в качестве основных принципов корпоративной культуры выдвигают клиентоориентированность, открытость взаимодействия между работниками разных уровней, повышение уровня безопасности, мотивация сотрудников, отождествление себя с предприятием, командообразующие мероприятия, распределение ответственности между структурными подразделениями и взаимопомощь.

В организационных культурах отечественных промышленных предприятиях в последние годы развивается тенденция к гибкости общения [17, 18]. Подобные партнерские отношения внутри организации давно практикуются в западных странах, однако в России они проявляются в более свободной форме, ибо не регламентируются официальными документами. Подобная деформализация является одним из факторов риска, ибо система гибких отношений (*flexibility*) может нести разрушительный потенциал. На крупных промышленных предприятиях необходимо искать оптимальное соотношение формального и неформального [19]. В нахождении подобного баланса

помогают цифровые технологии [20] и социальные технологии, внедрение которых позволяет наиболее рационально достигать поставленных целей, увеличивая производительность и эффективность работы всей организации, а также внутренних трудовых отношений.

Корпоративная культура современных отечественных промышленных предприятий – это определенная система ценностей и моделей поведения, одобряемая и предприятием, и сотрудниками, основу которой составляют моральные и нравственные принципы, используемые в ходе трудовой и коммуникативной деятельности. Несовпадение ценностей сотрудника и организации приводит к сложности, а иногда и невозможности реализации профессиональных навыков работника и внесения вклада в развитие предприятия. Корпоративные ценности – это основа организационной культуры и они требуют активной разработки и усвоения среди работников промышленного предприятия.

Развитие корпоративной культуры на промышленных предприятиях является одним из наиболее эффективных способов повышения его эффективности. Формирование принципов корпоративной культуры, включающей в себя направленность на повышение уровня знаний, инновативности и организации, промышленные предприятия повышают уровень вовлеченности сотрудников, результативность их трудовой деятельности.

#### Библиографический список

1. Kotter J P and Heskett J L 1992 *Corporate Culture and Performance* NY: Free Press
2. Brickson S L Organizational identity orientation: the genesis of the role of the firm and distinct forms of social value 2007 *Academy of Management Review* vol **32** (3) pp 864–88. doi: 10.5465/AMR.2007.25275679
3. Farkhidinova O M and Shumkova V A Overcoming ontological alienation in the urban environment 2019 *Journal of Siberian Federal University – Humanities and Social Sciences* vol **12**(5) pp 771–79
4. Adhikari B K Causal effect of analyst following on corporate social responsibility 2016 *Journal of Corporate Finance* vol **41** pp 201–16 doi: 10.1016/j.jcorpfin.2016.08.010
5. Fisher E 2015 *Ethical Turn in International Development International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition)* ed J Wright Elsevier pp 60–62 doi:10.1016/B978-0-08-097086-8.10153-9
6. Deal T E and Kennedy AA 1982 *Corporate Cultures: The Rites and Rituals of Corporate Life* Harmondsworth: Penguin Books
7. Wan P, Chen X and Ke Y Does corporate integrity culture matter to corporate social responsibility? Evidence from China 2020 *Journal of Cleaner Production* vol **259** doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120877
8. Adhikari B K Causal effect of analyst following on corporate social responsibility 2016 *Journal of Corporate Finance* vol **41** pp 201–16 doi: 10.1016/j.jcorpfin.2016.08.010
9. Schmitz–Rixen T and Grundmann R T Surgical leadership within rapidly changing working conditions in Germany 2020 *Innovative Surgical Sciences* vol **4**(2) pp 51–7
10. Fisher E 2015 *Ethical Turn in International Development International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences (Second Edition)* ed J Wright Elsevier p 61 doi:10.1016/B978-0-08-097086-8.10153-9
11. Zack M, McKeen J and Singh S Knowledge management and organizational performance: an exploratory analysis 2009 *Journal of Knowledge Management* vol **13** pp 392–409 doi:10.1108/13673270910997088
12. Brickson S L Organizational identity orientation: the genesis of the role of the firm and distinct forms of social value 2007 *Academy of Management Review* vol **32** (3) pp 862–71 doi: 10.5465/AMR.2007.25275679
13. Brammer S and Millington A Corporate reputation and philanthropy: An empirical analysis 2005 *Journal of Business Ethics* vol **61** (1) pp 29–44 doi: 10.1007/s10551-005-7443-4

14. Tarus D and Sitienei E Intellectual capital and innovativeness in software development firms: the moderating role of firm size 2015 *Journal of African Business* vol 16 pp 48–65 doi:10.1080/15228916.2015.1061284
15. Mention A and Bontis N Intellectual capital and performance within the banking sector of Luxembourg and Belgium 2013 *Journal of Intellectual Capital* vol 14 pp 286–309 doi:10.1108/14691931311323896
16. Kotter J P and Heskett J L 1992 *Corporate Culture and Performance* NY: Free Press
17. Anderson C A and Anthony R N 1986 *The New Corporate Directors* NY: Wiley
18. Bushmarin I V Формирование трудовых ресурсов: опыт Запада и России 2005 *Международная Экономика и Международные Отношения* vol 2 pp 48–52
19. Bakeeva E V The onto logical sense of the concept of «measure» 2017 *Rivista di Filosofia Neo-Scolastica* vol 2 pp 471–83
20. Tomyuk O N, Dyachkova M A, Kirillova N B and Dudchik A Yu Digitalization of the educational environment as a factor of personal and professional self-determination of students 2019 *Perspektivy Nauki i Obrazovania* vol 42(6) pp 422–34

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

**Соколов Петр Борисович,**  
E-Mail: [p.sokolov@uralmash.ru](mailto:p.sokolov@uralmash.ru),  
**Муравьева Анастасия Валериевна,**  
E-Mail: [a.muraveva@uralmash.ru](mailto:a.muraveva@uralmash.ru),  
ПАО «Уралмашзавод»,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Основная проблема, возникающая при изготовлении составных валков, заключается в обеспечении надежного соединения бандажа с несущей осью. Специалистами ПАО «Уралмашзавод» разработаны оригинальные технические решения, позволяющие исключить круговое и осевое смещение бандажа относительно несущей оси, уменьшить растягивающие напряжения в бандаже и увеличить срок эксплуатации валка. Надежность крепления обеспечивается оригинальной механической сцепкой оси и бандажа, при этом не требуются детали крепления.

Предлагаемые конструкции и технология бандажирования целесообразны при изготовлении опорных валков станов горячей и холодной прокатки, крупных рабочих валков станов горячей прокатки, крупных роликов транспортных рольгангов, тянущих роликов линии вторичного охлаждения МНЛЗ, а также при ремонте (модернизации) преждевременно вышедших из строя прокатных валков.

Составные валки, изготовленные на новом технологическом уровне с использованием износостойких марок стали, смогут обеспечить современный уровень требований, касающихся глубины и допустимого разброса твердости по ширине и глубине активного слоя, и составить достойную конкуренцию импортным валкам лучших зарубежных фирм по основным параметрам эксплуатационной стойкости (достигнутой наработке, износостойкости, стабильности результатов и т. п.).

Восстановленные на основе инновационных решений опорные валки для стана 1300 ХП ООО «ВИЗ-Сталь» позволили существенно улучшить основные технические характеристики стана и качество выпускаемой продукции, при этом обеспечить возможность увеличения межперевалочной кампании за счет меньшего и равномерного износа рабочей поверхности бочки валков в процессе прокатки.

**Ключевые слова.** Составной валок, несущая ось, бандаж, натяг, износостойкость, эксплуатационная стойкость, эффективность.

Прокатные валки в значительной степени определяют качество готового проката, поскольку они непосредственно формируют заданный профиль и требуемую геометрию, придавая прокатываемому металлу необходимые потребительские характеристики и свойства.

Одним из перспективных направлений развития валкового производства по критериям качества и ресурсосбережения является восстановление работоспособности прокатных валков, имеющих ресурс по усталостной долговечности [1, 2].

Величина рабочего слоя у опорных валков составляет не более 10 % от общей массы валка. Однако по достижению минимально допустимого (скрапного) диаметра, металлургические предприятия вынуждены отправлять сределегированные валки в скрап, что, по меньшей мере, экономически нецелесообразно.

Одним из наиболее широко технологически освоенных способов восстановления работоспособности прокатных валков является метод бандажирования.

За рубежом бандажированные валки изготавливают в Германии, Чехии, Японии, Франции, Англии, Италии, Словении и др., а в странах СНГ – в ЧАО «НКМЗ», ОАО «Ижорские заводы», АО «ЕВРАЗ НТМК», ОРМЕТО-ЮУМЗ и ПАО «Уралмашзавод».

Определенный опыт в изготовлении составных (бандажированных) валков накоплен в ПАО «Уралмашзавод», где имеется специализированный участок для валков массой до 30 т, оборудованный стационарным стендом для их сборки, двумя камерными печами с выкатным подом, быстросъемными универсальными приспособлениями, для удержания несущих осей различных типоразмеров в вертикальном положении и их транспортировки в процессе сборки валков. Участок обслуживается двумя кранами, что позволяет ускорить операцию сборки валков и минимизировать тепловые потери. Например, для рельсобалочного стана фирмы «*Jindal Steel & Power*» (Индия) ПАО «Уралмашзавод» изготовило и поставило бандажированные валки 19 типоразмеров с бочкой диаметром 1400 мм и шириной от 290 до 680 мм. Бандажи и несущие оси изготавливались методомковки из слитков, при этом бандажи – из стали 90ХФ, а несущие оси – из стали 75ХМФА. Замечаний, претензий и рекламаций со стороны заказчика по работе составных валков не было.

Следует отметить, основные преимущества составных валков общеизвестны, однако заложенный в них потенциал далеко не исчерпан. Для дальнейшего развития метода бандажирования валков необходимо:

- разработать надежный способ крепления и конструкцию составного валка, которые бы исключали смещение бандажа относительно несущей оси, а также его поломки в процессе эксплуатации;
- разработать и освоить производство новых износостойких (включая стойких к выкрошкам и отслоениям), а также термостойких к разгарным трещинам марок валковых сталей (для крупных рабочих валков горячей прокатки);
- разработать новую технологию термообработки бандажей (заковки и низкотемпературного отпуска), позволяющей обеспечить допустимый разброс твердости по ширине и толщине бандажа в соответствии с мировым уровнем требований;
- выполнить прочностные расчеты с помощью современных программных комплексов (*ANSIS*, *DEFORM* и др.), а также расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) составных частей валка с целью оптимизации его конструктивных параметров.

Основной проблемой, возникающей при изготовлении составных (бандажированных) валков, является обеспечение надежного сцепления между несущей осью и бандажом.

В подавляющем большинстве известных и реализованных решений используется способ горячей посадки бандажа на гладкую ось (рис. 1, а) для создания требуемого натяга. Однако, случайные погрешности при изготовлении валков, а также аварийные

ситуации на прокатных станах, не позволяют полностью предотвратить сопрягаемые части составного валка от их прокручивания и осевых смещений, либо разрушения от чрезмерной величины натяга.

В ПАО «Уралмашзавод» разработаны инновационные конструкции составных валков, позволяющие полностью исключить круговое и осевое смещение бандажа относительно оси, уменьшить растягивающие напряжения в бандаже и увеличить срок их эксплуатации [3–5]. Надежность крепления обеспечивается оригинальной механической сцепкой оси и бандажа на основе эксцентрика, при этом не требуются детали крепления. Основная идея предложенных решений заключается в создании на посадочном участке тел вращения асимметричной фигуры эллиптической формы. Выступающие за контур в плоскости вращения (с одной либо двух сторон) серповидные участки надежно фиксируют составные части соединения и препятствуют их смещению друг относительно друга (рис. 1, б). По надежности и технологичности изготовления предложенные конструкции составных валков превосходят все отечественные и зарубежные аналоги. Данное решение практически нейтрализует такой технологически важный фактор как натяг, от которого в значительной степени зависит работоспособность валка. При этом уже не требуется высокая точность изготовления несущей оси и бандажа. Обработка и формирование посадочных поверхностей может быть выполнена на обычных станках без шлифовки, что упрощает изготовление валков и снижает трудозатраты [6–10].

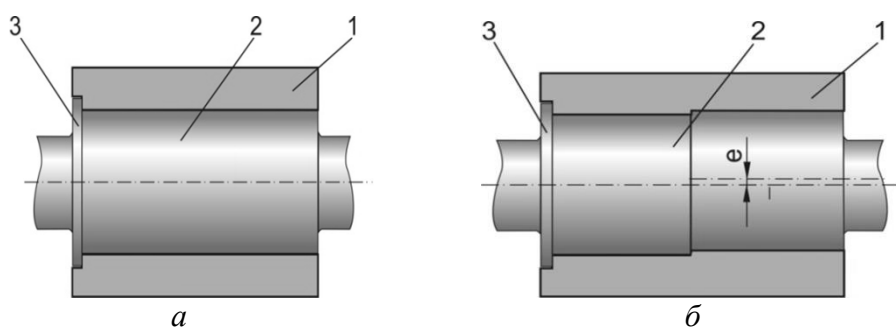


Рис. 1 Конструкции составных валков:

*a* – традиционная конструктивная схема составного валка;

*б* – разработанная схема составного валка;

1 – бандаж; 2 – несущая ось; 3 – ограничительный бурт; *e* – эксцентриситет

В 2016 г. ООО «ВИЗ-Сталь» обратилось с просьбой к ПАО «Уралмашзавод» о восстановлении работоспособности двух опорных валков 1400×1300 стана 1300 холодной прокатки на основе вышеупомянутых инновационных разработок, которые оказались наиболее привлекательными для заказчика.

В соответствии с условиями заключенного контракта, в качестве исходных заготовок для несущих осей составных валков использовались списанные цельнокованные валки, проработавшие на стане 1300 холодной прокатки в течение 2-х лет, а бандажи для валков изготавливались из новых поковок (сталь 75Х3МФА).

Еще до начала рабочего проектирования в ПАО «Уралмашзавод» были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) составных валков с использованием многоцелевого программного комплекса «ANSIS» применительно к реальным условиям прокатки на стане 1300 ХП. Для расчета были разработаны объемные 3D модели с нанесением сетки конечных элементов как на бандаже, так и на несущей оси.

Установлено, что существенным фактором, влияющим на уровень напряжений в бандаже, является величина натяга. Например, с учетом реальных нагрузок стана 1300 ХП, напряжения в бандаже с меньшей величиной натяга снижаются примерно в 1,75 раза, что позволило уменьшить величину натяга на 30 % в сравнении с общепринятым значением при традиционной технологии сборки (0,001 от посадочного диаметра).



Полученные результаты позволили обосновать величину натяга применительно к условиям эксплуатации валков на стане, определить оптимальные конструктивные параметры несущей оси и бандажа при различных схемах нагружения составных валков, сформулировать рекомендации по упрощению технологии их сборки.

Кроме того, предложенная заказчику конструкция составных валков была исследована на физической модели [11] в масштабе 1:25, принцип работы которой и соотношение длин основных элементов соединения соответствовали реальным валкам. В результате, еще на стадии предпроектных разработок были наглядно и убедительно продемонстрированы преимущества инновационных решений.

По разработанным чертежам было организовано изготовление несущих осей и бандажей, а затем и их сборка в единое целое.

Механическая обработка отработанных валков, предназначенных для изготовления несущих осей, производилось на современном обрабатывающем центре с ЧПУ фирмы «РАМА» (Италия). В соответствии с проектом на несущих осях выполнены ограничительные бурты, а также необходимая профилировка посадочной поверхности с эксцентриситетом (рис. 2). Технологические возможности обрабатывающего центра позволили выполнить данную операцию без изготовления специальных бугелей.

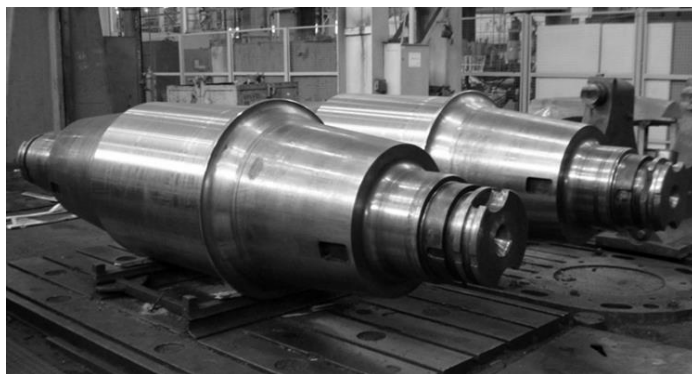


Рис. 2 Несущие оси составных валков

Объемная закалка бандажей, изготовленных из новых поковок, производилось в камерной печи термического цеха по штатной технологии. Профилировка внутренней посадочной поверхности закаленных бандажей выполнена ответной формы к посадочной поверхности несущих осей с учетом их фактических размеров. Данная операция (рис. 3) производилась на современном токарно-карусельном обрабатывающем центре с ЧПУ фирмы «Hankook» (Корея).



Рис. 3 Изготовление бандажей на обрабатывающем центре фирмы «Hankook» (Корея)

Монтаж и сборка составных валков произведен на специализированном участке термического цеха ПАО «Уралмашзавод» (рис. 4). Общая продолжительность операции сборки не превышала 5–7 мин.

После полного остывания составные опорные валки были направлены в механический цех завода для чистовой обработки.



Рис. 4 Сборка составных валков на специализированном участке

Восстановленные на новом технологическом уровне опорные валки (рис. 5) прошли все предусмотренные регламентом проверки сдаточные испытания и признаны годными, т. е. соответствующими требованиям чертежа и технической спецификации.



Рис. 5 Готовые составные валки

При входном контроле у заказчика все основные характеристики составных валков были подтверждены, при этом замечаний, касающихся точности выполнения геометрических размеров, уровня и разброса твердости по бочке опорных валков не было.

Несмотря на то, что составные валки нового типа являются, по существу, опытными и никогда на этом и других станах до этого не использовались, тем не менее, каких-либо предпочтений для них не было предусмотрено. Эксплуатация составных валков на стане 1300 ХП производилась в штатном режиме, в соответствии с технологической

инструкцией. Оба вала работают в паре. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о равномерном износе активного слоя валков (различие в диаметрах по краям бочки после межперевалочной кампании не превышало 0,02 мм), при этом разброс твердости вдоль бочки валков не превышал 3 HS, что соответствует современным общемировым требованиям.

При оптимистическом прогнозе эксплуатационная стойкость составных валков новой конструкции может превысить (к моменту списания) гарантированное контрактом значение более чем в 1,5 раза.

Таким образом, составные валки ПАО «Уралмашзавод» показали высокую стойкость к аварийным ситуациям в условиях тяжелонагруженного стана 1300 ХП, а выбранная марка стали вполне оправдала себя. Заложенная в конструкции составных валков оригинальная сцепка бандажа и несущей оси также подтвердила свою надежность и работоспособность. Каких-либо смещений бандажа относительно несущей оси не обнаружено [12–18].

По мнению заказчика, оригинальные технические решения, заложенные в конструкцию и технологию сборки составных валков, позволили существенно улучшить основные технические характеристики стана и качество выпускаемой продукции, при этом обеспечить возможность увеличения межперевалочной кампании за счет меньшего и равномерного износа рабочей поверхности бочки валков в процессе прокатки.

Успешная эксплуатация опорных валков в условиях ООО «ВИЗ-Сталь», несмотря на инциденты в виде вмятин, надавов и др., возникающих из-за порыва полосы, побудила ПАО «НЛМК» испытать подобные валки на стане 1400 ХП, тем более что опорные валки обоих станов подобны по геометрическим параметрам, а современный прокатываемый сортамент стана также включает электротехнические марки стали: трансформаторные, динамные и др. Стан 1400 ХП работает в интенсивном режиме, а его существующая производительность превышает проектную более чем в 1,5 раза.

Следует отметить, что технология бандажирования может быть применена не только к бочке, но и к шейкам вала, особенно к посадочным местам под подшипники (с целью увеличения их износостойкости, а также при ремонте шеек после привара подшипника). Существенно может быть расширена номенклатура валков большой массы, изготовление которых в монолитном цельнокованом варианте в настоящее время пока не представляется возможным (например, валки массой 75–78 т), а также область применения составных валков. Бандажирование целесообразно к использованию при ремонте (модернизации) преждевременного вышедших из строя прокатных валков, а также при изготовлении крупных рабочих валков станов горячей прокатки и роликов транспортных рольгангов, тянущих роликов линии вторичного охлаждения МНЛЗ и др.

Составные (бандажированные) валки, изготовленные на новом технологическом уровне с использованием износостойких марок стали (45Х5МФ, 150ХНМ и др.), смогут обеспечить современный уровень требований, касающихся глубины и допустимого разброса твердости по ширине и глубине активного слоя, и составить достойную конкуренцию импортным валкам лучших зарубежных фирм по основным параметрам эксплуатационной стойкости (достигнутой наработке, износостойкости, стабильности результатов и т. п.).

Составные валки позволят наиболее полно реализовать технический потенциал станов горячей и холодной прокатки, повысить эффективность их работы и улучшить качество готового проката.

Использование бандажей на основе износостойких материалов позволит существенно повысить эксплуатационные характеристики прокатных валков (общую наработку, межперевалочные кампании, стабильность результатов и т. п.), а также их стойкость к аварийным ситуациям.

## Библиографический список

1. Белевский, Л. С. Составные прокатные валки / Л. С. Белевский, А. Ю. Фиркович, И. В. Судоргин [и др.]. – Магнитогорск : МГТУ им. Носова, 2004. – 206 с.
2. Фиркович, А. Ю. Опыт восстановления опорных валков методом их бандажирования / А. Ю. Фиркович, Р. И. Черкасский, А. В. Кушнарев, И. В. Боровков [и др.] // Черные металлы. – № 8. – 2001. – С. 29–30.
3. Пат. 2310530 РФ, МПК В21В 02/33. Составной прокатный валок / П. Б. Соколов, Р. Я. Шарафутдинов, 2007. – Бюл. № 32.
4. Пат. 2561618 РФ, МПК В21В 27/03. Составной прокатный валок / П. Б. Соколов, С. А. Червяков, 2015. – Бюл. № 24.
5. Пат. 2643848 РФ, МПК В21В 27/03. Составной прокатный валок / П. Б. Соколов, В. Л. Юрьев, Н. Ф. Хасанова, 2018. – Бюл. № 4.
6. Соколов, П. Б. Повышение эффективности использования составных прокатных валков / П. Б. Соколов, Ю. Б. Хлопотунов // Труды восьмого конгресса прокатчиков, Магнитогорск, 11–15 октября 2010. – Том 1. – 2010. – С. 371–378.
7. Соколов, П. Б. Эффективность использования составных валков на станах горячей и холодной прокатки / П. Б. Соколов, Ю. Б. Хлопотунов // Сб. тр. конф. ; Москва 09–12 ноября 2010. – Москва, 2010. – С. 238–243.
8. Соколов, П. Б. Повышение эффективности использования составных валков на станах горячей и холодной прокатки / П. Б. Соколов // Сталь. – 2013. – № 9. – С. 56–58.
9. Соколов П. Б. Эффективность использования бандажированных валков на прокатных станах / П. Б. Соколов // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 6. – С. 27–31.
10. Sokolov, P. V. «Efficiency of sleeved rolls at rolling mills», Steel & metallurgy (India). – 2016. – Vol.18. – No. 06. – P. 44–48.
11. Пат. на ПМ 187632 РФ, МПК В21В 27/03. Демонстрационная модель составного валка / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева, 2019. – Бюл. № 8.
12. Соколов, П. Б. Опыт восстановления работоспособности тел вращения (на примере промышленного вентилятора и прокатных валков) / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Тр. XI конгресса прокатчиков. – Магнитогорск, 09–12 октября 2017. – Том II. – С. 309–321.
13. Соколов, П. Б. Восстановление работоспособности опорных валков стана 1300 холодной прокатки ООО «ВИЗ-Сталь» / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 11–12. – С. 38–42.
14. Соколов, П. Б. Работоспособность бандажированных опорных валков в условиях стана 1300 холодной прокатки ООО «ВИЗ-Сталь» / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 11–12. – С. 35–38.
15. Sokolov, P. V. «Repair of Sleeved Backup Rolls Produced by "Uralmashplant" JSC at VIZ-Steel Cold-Rolling Mill 1300» / P. V. Sokolov, A. V. Muravieva // Tyazheloe mashinostroenie. – 2018. – No. 11–12. – P. 39–41.
16. Соколов, П. Б. Эффективность эксплуатации составных прокатных валков в условиях стана 1300 холодной прокатки ООО «ВИЗ-Сталь» / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Сб. тезисов докладов 77-й международной конференции. – Магнитогорск : 22–26 апреля 2019. – Том 1. – С. 152.
17. Соколов, П. Б. Эффективность использования составных прокатных валков в условиях стана 1300 холодной прокатки ООО «ВИЗ-Сталь» / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Сб. тр. конф., Москва 13–16 ноября 2018. – Москва, 2018. – С. 292–298.
18. Соколов, П. Б. Разработка, исследование и внедрение инновационной технологии восстановления работоспособности прокатных валков и других тел вращения / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и эконом. информации. – 2019. – Т. 75. – № 9. – С. 1077–1085.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВАЛКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА В ПАО «УРАЛМАШЗАВОД»

Соколов Петр Борисович,  
E-Mail: [p.sokolov@uralmash.ru](mailto:p.sokolov@uralmash.ru),  
Муравьева Анастасия Валериевна,  
E-Mail: [a.muraveva@uralmash.ru](mailto:a.muraveva@uralmash.ru),  
ПАО «Уралмашзавод»,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** С учетом требований заказчиков в ПАО «Уралмашзавод» постоянно производится совершенствование технологии производства прокатных валков, направленное на повышение их потребительских характеристик. При активной поддержке АО «Газпромбанк» на производственной площадке ПАО «Уралмашзавод» проводится широкомасштабная модернизация валкового производства, программа которой предусматривает создание современного термического производства с установкой высокоэффективных агрегатов с системами контроля и компьютерной диагностики, а также обновление станочного парка, включающее его модернизацию и приобретение новых высокоточных станков и обрабатывающих центров с числовым программным управлением (ЧПУ).

Ввод в эксплуатацию нового современного, а также модернизация существующего технологического оборудования, несомненно, даст ощутимый эффект за счет более высоких его технических характеристик.

Реализация проекта в полном объеме позволит существенно повысить качество выпускаемой продукции, оптимизировать внутрипроизводственную логистику, увеличить объемы производства валков и снизить их себестоимость.

ПАО «Уралмашзавод» является поставщиком ключевого оборудования базовых отраслей промышленности (горнодобывающей, металлургической).

Использование на прокатных станах высококачественных валков ПАО «Уралмашзавод», изготовленных на новом технологическом уровне, позволит металлургам эффективно решить задачу импортозамещения, за счет существенного снижения затрат на их приобретение.

**Ключевые слова.** Прокатные валки, инвестиционная программа, модернизация производства, номенклатура валков, оптимизация затрат, эффективность, валковый бизнес, повышение качества, потребительские характеристики.

В настоящее время одним из основных стратегических направлений в номенклатуре продукции ПАО «Уралмашзавод» являются прокатные валки, производство которых началось в 1934 г. За счет ввода нового оборудования и совершенствования технологии изготовления прокатных валков происходило постоянное наращивание объемов их поставки.

Валки являются неотъемлемой частью прокатных станов, которые используются при изготовлении всевозможных видов проката – от тончайшего листа (жести, фольги) до проката строительного назначения.

Прокатные валки, изготавливаемые ПАО «Уралмашзаводом» [1–5]: рабочие и опорные валки листовых станов горячей и холодной прокатки; валки блюмингов и слябингов; валки заготовочных, рельсобалочных и универсально-рельсобалочных станов; валки сортовых станов; вертикальные валки листовых станов горячей прокатки; рабочие и опорные валки для дрессировочных и реверсивных станов; валки трубных станов; составные (бандажированные) валки и бандажи к ним [6–14].

Для того чтобы в условиях жесткой конкуренции с зарубежными производителями сохранить свои позиции на мировом рынке валков, требуется новое качество валков

в соответствии с международными стандартами. Для обеспечения эффективной работы высокопроизводительных прокатных станов требуются прокатные валки с высокими и стабильными эксплуатационными характеристиками на протяжении всего периода их работы. Для достижения мирового уровня перед ПАО «Уралмашзавод» стоит задача по компактизации и широкомасштабной модернизации валкового производства.

Снижение затрат на логистику за счет компактного расположения цехов и увеличения объемов приведет к снижению себестоимости производства валков.

Одним из направлений развития нового производства является создание современного компактного термического цеха. Особую роль играет процесс термообработки в производстве прокатных валков, т. к. позволяет обеспечить требуемый уровень и допустимый разброс твердости вдоль бочки, а также допустимое ее падение к скрапному диаметру, сформировать требуемую структуру металла и благоприятную эпюру остаточных напряжений.

В настоящее время введенное и освоенное оборудование для термической обработки прокатных валков включает:

- горизонтальные и вертикальные термические печи (рис. 1) с керамоволокнистой футеровкой и автоматическими рекуперативными импульсными горелками;
- закалочные водяные и масляные баки (рис. 2);
- колпаковые газовые печи (рис. 3) с расширенным диапазоном рабочих температур;
- специальное устройство (стенд) для подвешивания, удержания и транспортировки валков в вертикальном положении;
- вспомогательное оборудование.



Рис. 1 Нагрев опорного валка в горизонтальной термической печи под закалку

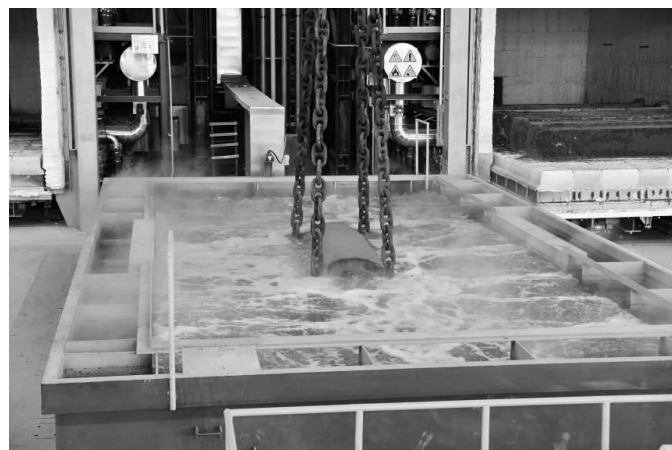


Рис. 2 Закалка прокатного валка в водяном баке

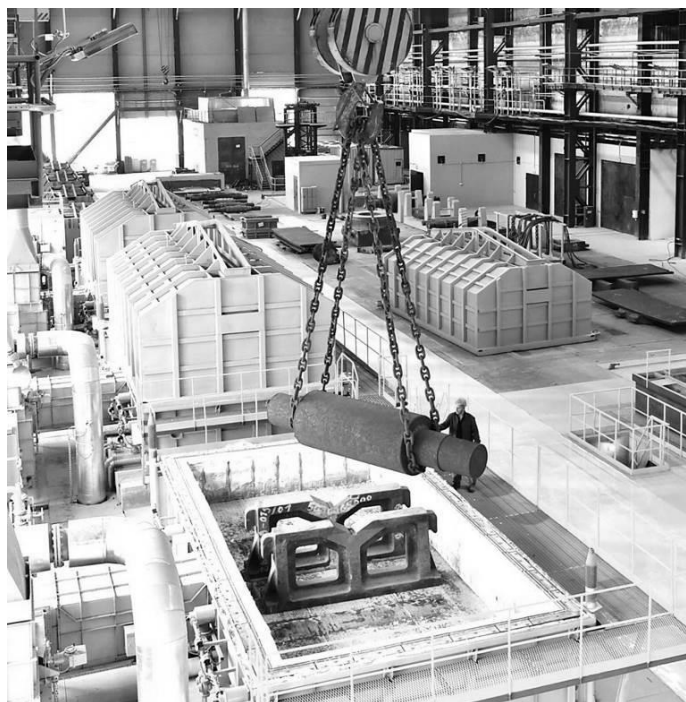


Рис. 3 Колпаковые газовые печи

В том же цехе предусмотрен ввод в эксплуатацию 2-х двухчастотных установок поверхностной закалки токами промышленной частоты (ТПЧ) (изготовитель и поставщик ООО «Промстройинжиниринг», г. Санкт-Петербург):

- первая установка предназначена для рабочих валков массой до 10 т и диаметром бочки до 700 мм;
- вторая – для опорных валков массой до 60 т и диаметром бочки до 1650 мм.

Обе установки уже смонтированы, ведутся пуско-наладочные работы по отработке технологии с целью определения оптимальных режимов закалки.

Освоение двухчастотных установок позволит обеспечить:

- увеличение глубины активного слоя на рабочих валках до 40 мм (и более), на опорных валках – до 100 мм;
- возможность закалки всей номенклатуры валков ПАО «Уралмашзавод», включая валки с 5 % содержанием хрома;
- расширение номенклатуры закаливаемых валков.

Следует отметить, что все уже введенные и освоенные, а также вновь вводимые агрегаты термического передела снабжены современными приборами и оборудованием для осуществления надлежащего контроля и компьютерной диагностики на всех стадиях термообработки.

Ввод в эксплуатацию нового современного термического оборудования, несомненно, даст ощутимый эффект за счет более высоких его технических характеристик.

Еще одним из направлений развития нового производства является модернизация станочного парка предприятия.

Введены в эксплуатацию новые современные порталные обрабатывающие центры с ЧПУ фирмы «РАМА» (Италия): 3000, 200, 160 и 130.

Горизонтально-расточной обрабатывающий центр «РАМА 3000» предназначен для обработки деталей сложной конфигурации с высокой точностью, а обрабатывающий центр «РАМА 200» (рис. 4) – для выполнения на прокатных валках пазов, шлицевых соединений и др. элементов с высокой точностью.



Рис. 4 Обрабатывающий центр «РАМА 200» с ЧПУ (Италия)

Обрабатывающий центр «РАМА 160» предназначен для обработки прокатных валков массой до 30 т, а также деталей для машин непрерывного литья, кузнечно-прессового, бурового и др. оборудования, а «РАМА 130» – для обработки, как прокатных валков, так и сложных высокоточных корпусных деталей (конусы, редукторы и др.) массой до 20 т.

На заводе внедрен и освоен большой токарно-карусельный обрабатывающий центр с ЧПУ фирмы «Hankook» (Корея), который представлен на рис. 5.



Рис. 5 Большой токарно-карусельный обрабатывающий центр с ЧПУ фирмы «Hankook» (Корея)

Введенный в эксплуатацию новый ленточнопильный станок «SOITAAB» (Италия) позволил увеличить скорость резания в 5–7 раз в сравнении с круглопильными станками, при этом ширина реза снизилась с 12–14 мм до 1,6 мм (рис. 6).





Рис. 6 Ленточнопильный станок фирмы «SOITAB» (Италия)

С помощью фирмы «SBA» (Австрия) проведена модернизация вальцешлифовального станка «Waldrich Siegen» (рис. 7), которая существенно повысила его технологические возможности (обрабатывать валки массой до 54 т).



Рис. 7 Модернизированный вальцешлифовальный станок «Waldrich Siegen» (Германия)

При поддержке АО «Газпромбанк» на производственной площадке ПАО «Уралмашзавод» проводится широкомасштабная модернизация валкового производства, программа которой предусматривает создание современного термического производства с установкой высокоэффективных агрегатов с системами контроля и компьютерной диагностики, а также обновление станочного парка, включающее его модернизацию и приобретение новых высокоточных станков и обрабатывающих центров с ЧПУ.

Производство прокатных валков – приоритетное направление деятельности ПАО «Уралмашзавод».

За плечами ПАО «Уралмашзавод» огромный опыт в изготовлении прокатных валков как цельнокованых, так и составных. Восстановление работоспособности методом бандажирования позволяет существенно повысить эффективность их использования. В ПАО «Уралмашзавод» разработана уникальная технология восстановления и повышения работоспособности отработанных валков, имеющих ресурс по усталостной долговечности. Данная технология позволяет исключить круговое и осевое смещение бандажа относительно несущей оси и уменьшить растягивающие напряжения.

На существующей производственной площадке ПАО «Уралмашзавод» в 2017 г. по новой технологии были восстановлены опорные валки 1400×1300 на специализированном участке по сборке бандажированных валков массой до 30 т.

Данный участок оборудован печью с выкатным подом, стендом для сборки валков, а также быстросъемными универсальными приспособлениями, для удержания несущих осей различных типоразмеров в вертикальном положении в процессе сборки валков. Участок обслуживается двумя кранами, что позволяет ускорить процесс сборки и минимизировать тепловые потери.

Составные валки 1400×1300 и по сей день работают в условиях тяжело нагруженного стана 1300 ХП ООО «ВИЗ-Сталь», которые соответствуют всем требованиям надежности. Замечаний со стороны заказчика нет.

ПАО «Уралмашзавод» – это значимое предприятие не только для Свердловской области, но и для всей страны.

#### Библиографический список

1. Журавлева, О. А. Освоение производства кованных валков с содержанием хрома 5 процентов / О. А. Журавлева // Материалы конф. Производство прокатных валков. Екатеринбург, 7–8 октября, 2004. – С. 24–31.

2. Соколов, П. Б. Эксплуатация прокатных валков ОАО «Уралмашзавод» с 3–5 % содержанием хрома / П. Б. Соколов, Ю. Б. Хлопотунов // Тр. восьмого конгресса прокатчиков. – Магнитогорск, 11–15 октября 2010. – Том 1. – С. 366–370.

3. Соколов, П. Б. Эксплуатационная стойкость прокатных валков ОАО «Уралмашзавод» с повышенным (3–5 %) содержанием хрома / П. Б. Соколов, Ю. Б. Хлопотунов // Сб. тр. конф. 09–12 ноября 2010. – Москва, 2010. – С. 255–260.

4. Соколов, П. Б. Эксплуатация прокатных валков ОАО «Уралмашзавод» с содержанием хрома 3–5 % / П. Б. Соколов // Сталь. – 2014. – № 1. – С. 35–37.

5. Соколов, П. Б. Эффективность использования прокатных валков ПАО «Уралмашзавод» с повышенным содержанием хрома / П. Б. Соколов, А. Ю. Варваров // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 9. – С. 27–30.

6. Соколов, П. Б. Повышение эффективности использования составных валков на станах горячей и холодной прокатки / П. Б. Соколов // Сталь. – 2013. – № 9. – С. 56–58.

7. Соколов, П. Б. Эффективность использования бандажированных валков на прокатных станах / П. Б. Соколов // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 6. – С. 27–31.

8. Sokolov, P. B. «Efficiency of sleeved rolls at rolling mills», Steel & metallurgy (India), 2016. – Vol. 18. – No. 06. – P. 44–48.

9. Соколов, П. Б. Опыт восстановления работоспособности тел вращения (на примере промышленного вентилятора и прокатных валков) / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Тр. XI конгресса прокатчиков. – Магнитогорск, 09–12 октября 2017. – Том II. – С. 309–321.

10. Соколов, П. Б. Восстановление работоспособности опорных валков стана 1300 холодной прокатки ООО «ВИЗ-Сталь» / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 11–12. – С. 38–42.

11. Соколов, П. Б. Работоспособность бандажированных опорных валков в условиях стана 1300 холодной прокатки ООО «ВИЗ-Сталь» / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Тяжелое машиностроение. – 2018. – № 11–12. – С. 35–38.

12. Соколов, П. Б. Эффективность использования составных прокатных валков в условиях стана 1300 холодной прокатки ООО «ВИЗ-Сталь» / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Сб. тр. конф. 13–16 ноября 2018. – Москва, 2018. – С. 292–298.

13. Соколов, П. Б. Разработка, исследование и внедрение инновационной технологии восстановления работоспособности прокатных валков и других тел вращения / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Черная металлургия. Бюлл. науч.-техн. и экономической информации. – 2019. – Т. 75. – № 9. – С. 1077–1085.

14. Соколов, П. Б. Разработка и внедрение инновационной технологии восстановления и повышения работоспособности тел вращения / П. Б. Соколов, А. В. Муравьева // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2019. – Т. 10. – № 1. – С. 56–62.

15. Соколов, П. Б. Модернизация и перспективы развития валкового производства в ПАО «Уралмашзавод» / П. Б. Соколов, Н. Ф. Хасанова // Сб. тр. конф., Москва 09–12 ноября 2016. – Москва, 2016. – С. 220–229.

16. Соколов, П. Б. Инвестиции в качество прокатных валков ПАО «Уралмашзавод» / П. Б. Соколов, Н. Ф. Хасанова // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 34–38.

17. Боровков, И. В. Исследование стойкости рабочих валков станов холодной прокатки / И. В. Боровков, П. Б. Соколов, Ю. Д. Макаров // Сталь. – 2005. – № 5. – С. 58–60.

## **НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СЕТЬ СТАНЦИЙ ПРИЕМА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

**Спиридонов Александр Александрович,**

E-Mail: [sansan@tut.by](mailto:sansan@tut.by),

**Саечников Владимир Алексеевич,**

**Ушаков Дмитрий Владимирович,**

**Кезик Алексей Геннадьевич,**

**Черный Владимир Евгеньевич,**

**Верстаковская Анастасия Петровна,**

**Евчик Вячеслав Евгеньевич,**

Белорусский государственный университет,

г. Минск

**Аннотация.** В работе рассмотрена научно-образовательная сеть станций приема и обработки информации с низкоорбитальных образовательных космических аппаратов. Станции приема оснащены системой навигационно-баллистического обеспечения с временной синхронизацией. Данная сеть решает задачи приема и обработки телеметрии сверхмалых космических аппаратов, проведения измерений и определения их орбитальных параметров, обучения студентов аэрокосмических специальностей. Рассмотрены программно-аппаратные средства стационарной и мобильной наземной станции приема. Для мобильной наземной станции приема описана схема измерений параметров радиосигналов телеметрической информации. Рассмотрены режимы работы наземных станций приема, методы проведения и обработки результатов измерений, математические модели и алгоритмы, используемые для определения орбит. Приведены результаты тестирования наземной станции при приеме данных и измерениях орбиты СМКА с различной периодичностью передачи пакетов телеметрии. Проведено начальное определение параметров орбит СМКА *LUOJIA-1 01* по 20 измерениям времени приема и частоты радиосигналов телеметрии на нескольких витках при неизвестных значениях номинальной частоты радиосигнала и начальных орбитальных параметров. Рассмотрены результаты моделирования совместной работы сети трех разнесенных наземных станций приема по определению близких орбит космических аппаратов, запущенных в группировке за первую неделю полета.

**Ключевые слова.** Наземная станция приема, сверхмалый космический аппарат, телеметрия, определение орбиты.

Многие университеты разрабатывают собственные образовательные космические аппараты (КА) в качестве учебных лабораторий для подготовки студентов аэрокосмических специальностей, решения научных и технологических задач [1–2]. Обычно это сверхмалые космические аппараты (СМКА) массой до 10 кг, разработанные по стандарту *Cubesat* [2–3]. Для решения задач по управлению университетскими сверхмалыми космическими аппаратами (СМКА), слежению и проведения сеансов радиосвязи актуальными являются вопросы надежного и оперативного приема телеметрии, прогнозирования будущих положений космического аппарата (КА). Из-за ограниченности бюджета для управления и приема телеметрии университетского СМКА используют единичный наземный комплекс управления (НКУ), который располагается в черте города и имеет неудовлетворительные условия приема. Кроме того, связь НКУ с низкоорбитальным СМКА ограничена несколькими минутами 5–6 раз в день. Иногда университетский НКУ подключается к международным сетям станций приема СМКА. Примером этому может служить международная сеть станций приема «*Satnogs*» (более 900 станций приема), которая используется в качестве резервного канала связи с университетским наноспутником БГУ *CubeBel-1*, запущенным в октябре 2018 г.

Для прогнозирования будущих пролетов СМКА над университетской наземной станцией приема (НСП) и обработки информации используется модель SGP4 [4–5] с начальными орбитальными данными в формате *TLE* (*two-line elements* – двухстрочный набор элементов) системы *NORAD* (*North American Aerospace Defense Command* – Командование воздушно-космической обороны Северной Америки). Набор элементов *TLE* обновляются ежедневно и находятся в открытом доступе [6]. Но в долгосрочной перспективе или в случае военных конфликтов система *NORAD* имеет возможность отключить общий доступ к базе данных. Реже на борту малого космического аппарата для определения точных координат и скорости используют навигационный приемник [7]. Еще одним способом получения начальных данных для моделей прогнозирования движения СМКА является определение орбиты на основе измерений характеристик радиосигналов телеметрической или командной радиолинии [8]. Измеряемыми параметрами для бюджетной наземной станции приема являются время и доплеровский сдвиг частоты принимаемого радиосигнала [8–9].

В работе рассматривается возможность совместного приема телеметрии и определения орбиты СМКА стационарным университетским НКУ и несколькими мобильными НСП с временной синхронизацией и возможностью разнесения по территории Республики Беларусь. Задачи приема и обработки телеметрии на стационарной университетской НКУ решаются с помощью программно-аппаратных средств системы связи: антенн волновой канал с круговой поляризацией диапазона 435–438 МГц; системы приема на основе трансивера *IC-9100*; системы приема на основе модуля *SDR* приемника; поворотного устройства *YAESU G-5500* с блоком управления; управляющего компьютера; программное обеспечение (ПО) прогнозирования движения СМКА и характеристик радиосигналов; ПО моделирования и визуализации сценариев работы НСП и проведения экспресс-расчета стандартной навигационно-баллистической информации; ПО приема и обработки радиосигналов телеметрии. Задачи внешнетраекторных измерений и определения орбит решаются с помощью программно-аппаратных средств системы навигационно-баллистического обеспечения (НБО): *GPS* приемника; модуля измерения частоты и времени приема радиосигналов; ПО обработки измерений; ПО определения и уточнения орбит. Мобильная наземная станция приема состоит из всенаправленной «квадрифилярной» антенны диапазона 435–438 МГц; системы приема на основе модуля *SDR* приемника; управляющего промышленного компьютера; программно-аппаратных средств системы НБО. Программно-аппаратные

средства системы НБО для мобильной НСП включают *GPS* приемник; модуль измерения частоты и времени приема радиосигналов на основе микроконтроллера (МК) обработки времени и двухканального цифрового осциллографа; ПО обработки измерений; ПО определения и уточнения орбит.

Схема измерений параметров радиосигналов телеметрической информации (ТМИ) СМКА для мобильной НСП представлена на рис. 1. Радиосигналы пакетов ТМИ после преобразования на промежуточную частоту в аналоговой части *SDR* приемника поступают для дальнейшего обработки в АЦП и на 2 вход двухканального цифрового осциллографа. С триггера *SDR* приемника на вход МК обработки времени поступает сигнал прихода пакета ТМИ в момент времени  $t_1$  (рис. 2). *GPS* модуль принимает, обрабатывает радиосигналы навигационных космических аппаратов (НКА) и передает на 1 вход двухканального цифрового осциллографа и на вход МК обработки времени импульсные сигналы «1PPS», синхронизированные со шкалой спутниковой навигационной системы (СНС) ГЛОНАСС или *GPS* (по выбору) и *NMEA* пакеты. *NMEA* пакеты содержат информацию о точных координатах приемной антенны радиосигналов НКА, точном системном времени СНС на момент прихода *NMEA* пакета и точном времени прихода «1PPS» сигнала. Сигнал прихода пакета ТМИ с триггера *SDR* приемника включает таймер МК обработки времени, который измеряет интервал времени  $\tau$  между приходом следующего «1PPS» сигнала от *GPS* приемника (рис. 2). В *NMEA* пакете, который следует за «1PPS» сигналом записано его точное время прихода  $t_1 + \tau$ . МК обработки времени рассчитывает момент времени  $t_1$  прихода радиосигнала пакета ТМИ и передает его в промышленный компьютер.



Рис. 1 Схема измерений параметров радиосигналов телеметрии СМКА

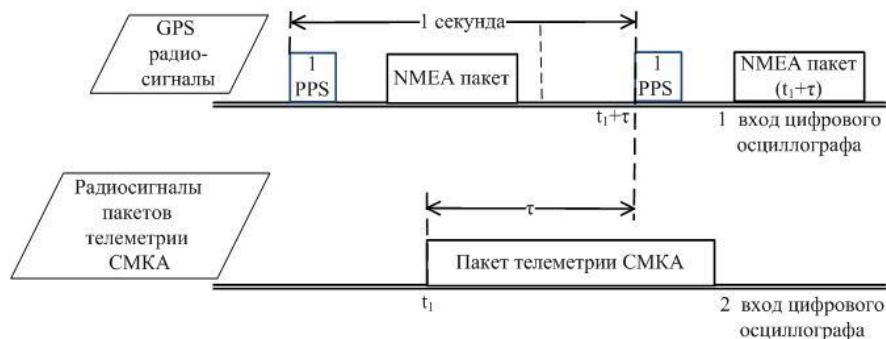


Рис. 2 Временная диаграмма радиосигналов пакетов ТМИ, *NMEA* пакетов и *1PPS* сигналов

Временная диаграмма радиосигналов пакетов ТМИ, *NMEA* пакетов и *1PPS* сигналов записывается цифровым осциллографом и передается в промышленный компьютер для обработки и нахождения частоты принимаемого радиосигнала пакета ТМИ и проверки измерений времени его прихода.

Сеансы связи между СМКА и НСП по функциональному признаку разделяются на: сеанс управления СМКА; сеанс приема телеметрии, сеанс проведения баллистических измерений. По командной радиолинии от НСП к СМКА передается радиосигнал, содержащий пакет команд управления или измерительный радиосигнал в запросном сеансе проведения измерений. Обрато от СМКА к НСП приходит пакет ответных квитанций или измерительный радиосигнал. По телеметрической радиолинии от СМКА к НСП приходит радиосигнал пакетов телеметрии или измерительный радиосигнал в беззапросном сеансе проведения измерений. Измерения параметров орбиты на одном пролете СМКА над НСП могут проводиться как в одной точке орбиты, так и в нескольких точках. Максимальный интервал пролета СМКА составляет от 10 до 12 мин для высоты орбиты от 350 до 600 км. Поэтому для обработки данных измерений на одном пролете над НСП можно использовать простейшую модель невозмущенного движения СМКА. Измерения орбиты могут проводиться на нескольких пролетах СМКА над НСП. Характерное значение периода орбиты СМКА для высоты от 350 до 600 км составляет от 90 до 102 мин. После трех последовательных пролетов СМКА над НСП следует перерыв с интервалом 8–9 ч. Поэтому для обработки данных измерений на нескольких пролетах над НСП целесообразно использовать модели возмущенного движения СМКА.

Система НБО наземной станции приема может проводить измерения орбит СМКА как с первоначально известными параметрами (режим слежения), так и с неизвестными параметрами (режим всенаправленного поиска). Для обработки измерений в режиме слежения в качестве начальных данных используют орбитальные элементы в формате *TLE* или собственной базы данных. ПО прогнозирования движения СМКА по известным начальным параметрам орбит рассчитывает сеансы радиосвязи, предполагаемые параметры следящих систем поворотных устройств, частоты принимаемых радиосигналов. Основная решаемая задача – это проверка параметров орбиты СМКА и их уточнение. В расчетах используется метод дифференциальной коррекции орбитальных параметров по скорости изменения наклонной дальности между НСП и СМКА, рассчитанной по доплеровскому сдвигу частоты принимаемого радиосигнала. При измерениях орбит СМКА в режиме всенаправленного поиска решается задача начального определения параметров орбиты СМКА. Частота целевого спутника ищется в пределах радиоловительского диапазона 435–445 МГц. Определяются отличительные признаки радиосигналов пакетов телеметрии (частота следования пакетов, наличие меток и т. д.). По результатам измерений на нескольких витках оценивается частота радиосигнала, период СМКА, максимальная длительность пролета над НСП, проводятся оценки допустимого предела ошибки измерений. Для обработки измерений на одном пролете СМКА над НСП используются алгоритмы определения вектора состояния на основе модели невозмущенного движения, а на нескольких пролетах – алгоритмы определения орбиты на основе простейших моделей возмущенного движения.

Разработанный экспериментальный образец мобильной НСП тестировался при приеме данных и измерения орбиты СМКА с различной периодичностью передачи пакетов ТМИ. Измерялись время и частота принимаемых радиосигналов ТМИ СМКА *CubeBel-1* (измерения проводились на одном пролете с периодичностью передачи пакетов 40 с) и *LUOJIA-1 01* (измерения проводились на нескольких пролетах с периодичностью передачи пакетов 6 мин). Данные измерения на одном (для *CubeBel-1*) и нескольких последовательных пролетах (для *LUOJIA-1 01*) СМКА по доплеровскому сдвигу частоты на моменты приема ТМИ сравнивались с результатами моделирования на основе модели *SGP 4* по начальным данным в формате *TLE*. Показано, что экспериментальные данные по доплеровскому сдвигу частоты хорошо согласуются с данными численного моделирования. Ошибки измеренной частоты принимаемых радиосигналов СМКА относительно расчетных по модели *SGP 4* не превосходили 300 Гц.

Проведено начальное определение параметров орбит СМКА *LUOJIA-1 01* при неизвестных значениях номинальной частоты радиосигнала и начальных орбитальных параметров. Для обработки измерений СМКА *LUOJIA-1 01* на нескольких пролетах

использовался алгоритм определения на основе модели кругового возмущенного движения. Для обоснования математической модели кругового возмущенного движения проводился анализ орбитальных параметров, КА на низких орбитах (высота до 2000 км) по базе данных системы *NORAD* (на 07.10.2019 г.). Анализ показал, что подавляющее большинство КА (более 90 %) движется по орбитам, близким к круговым (эксцентриситет  $e \ll 1$ ). Для университетских СМКА, разработанных по стандарту *Cubesat*, дополнительно был проведен анализ их орбитальных параметров и динамики изменения за неделю пролета. Результаты анализа показывают, что эти СМКА имеют высоту орбиты менее 1000 км и практически круговую орбиту. Существует два типа характерных орбит *Cubesat*. Первый тип орбит связан с СМКА, запущенными с Международной космической станции (МКС). Они имеют наклонение орбиты около  $51.6^\circ$ , период обращения от 90 до 94 мин, высоту орбиты от 330 км до 430 км. Второй тип орбиты связан с СМКА, запущенными на солнечно-синхронную орбиту попутным запуском. Они имеют наклонение орбиты от  $97^\circ$  до  $99^\circ$ , период обращения от 94 до 102 мин, высоту орбиты от 500 км до 800 км. Доплеровский сдвиг частоты принимаемого радиосигнала ТМИ этих СМКА при пролете в зоне радиовидимости над НСП Минск изменялся в диапазоне от  $-10,4$  кГц до  $+10,4$  кГц (для номинальной частоты в диапазоне от 435 до 438 МГц).

Определение орбиты *LUOJIA-1 01* проводилось по 20 измерениям времени приема  $t_i$  и частоты радиосигналов ТМИ  $f_i$  ( $i = 1-20$ ) на нескольких витках за период с 07.10.2019 до 09.10.2019 (UTC) над университетской НСП Минск (широта  $\varphi = 53^\circ 54' 27''$  СШ, долгота  $\lambda = 27^\circ 33' 52''$  ВД, высота  $H = 0,23$  км). Проводилась оценка средней частоты приема  $f_{cp} = 437.25$  МГц, интервалов между радиосигналами  $\Delta t_1$  на одном витке, а также интервалов между радиосигналами  $\Delta t_2$  на соседних витках. Рассчитывался доплеровский сдвиг частоты радиосигнала ТМИ;  $\Delta f_i = f_i - f_{cp}$ . На одном пролете СМКА радиосигналы передавались с интервалом  $\Delta t_1$  равном 6 мин или 12 мин по два последовательных пакета, что позволило различать их на фоне других радиосигналов. Интервалы между радиосигналами  $\Delta t_2$  на соседних витках составили 90, 96 (в основном) и 102 мин. Это позволило предположить, что данная неизвестная орбита СМКА относится к орбите второго типа. Для алгоритма определения были заданы диапазоны изменения параметров круговой орбиты: периода обращения  $T$  от 94 до 102 мин с шагом 1 с, наклонения орбиты  $i$  от  $97^\circ$  до  $99^\circ$  с шагом  $0.01^\circ$ , аргумента широты  $u$  от  $20^\circ$  до  $180^\circ$  с шагом  $1^\circ$  и долготы восходящего узла орбиты  $\Omega$  от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $1^\circ$ .

Модель возмущенного кругового движения СМКА (рис. 3) учитывала вековые возмущения долготы восходящего узла  $\Omega$ , обусловленные гравитационным потенциалом. Рассчитывалась вероятность успеха  $\beta$  данного набора орбитальных параметров ( $T, i, u, \Omega$ ) для момента времени  $t_2 = 20:54:16$  09.10.2019 г. (UTC) по оценке расчетных угла места  $el$  СМКА и доплеровского сдвига частоты  $\Delta f_{calc}$  принимаемого радиосигнала ТМИ:

$$\beta = (N/N_{total}) \cdot 100 \%,$$

где  $N, N_{total} = 20$  – количество расчетных точек и общее количество точек измерений, в которых проводилось численное моделирование с углом места  $el > 0$  и ошибкой  $|\Delta f - \Delta f_{calc}| < 300$  Гц измеренного доплеровского сдвига частоты  $\Delta f$  радиосигнала ТМИ относительно расчетного  $\Delta f_{calc}$  для данного набора орбитальных параметров ( $T, i, u, \Omega$ ).

На рис. 4 представлена зависимость количества возможных наборов орбитальных параметров ( $T, i, u, \Omega$ ) от вероятности успеха данного набора орбитальных параметров  $\beta$ . Получено, что для момента времени  $t_2$  с вероятностью успеха  $\beta$  выше от 50 % диапазона изменения орбитальных параметров составляли: для периода обращения  $T$  от 5852 до 5859 с, наклонения орбиты  $i$  от  $97.97^\circ$  до  $97.99^\circ$ , аргумента широты  $u$  от  $114^\circ$  до  $117^\circ$  и долготы восходящего узла орбиты  $\Omega$  от  $356^\circ$  до  $4^\circ$ . Существует только один набор орбитальных параметров ( $T, i, u, \Omega$ ) = (5855 с,  $97.98^\circ$ ,  $115^\circ$ ,  $359^\circ$ ) с вероятностью успеха  $\beta = 100 \%$ , один набор ( $T, i, u, \Omega$ ) = (5855 с,  $97.98^\circ$ ,  $115^\circ$ ,  $360^\circ$ ) с вероятностью успеха  $\beta = 95 \%$  и 60 наборов орбитальных параметров с вероятностью успеха  $\beta$  выше от 50 % до 75 %. По набору орбитальных параметров ( $T, i, u, \Omega$ ) = (5855 с,  $97.98^\circ$ ,  $115^\circ$ ,  $359^\circ$ ) и модели

кругового возмущенного движения рассчитаны угол места  $el$ , азимут  $az$  и доплеровский сдвиг частоты радиосигналов телеметрии  $\Delta f_{calc}$  на интервале от 0:0:0 до 23:59:59 10.10.2019 г. (UTC) следующих пролетов. На основе полученных данных осуществлен успешный прием и декодирование пакетов телеметрии СМКА *LUOJIA-1 01* на интервале пролета от 10:07:50 с до 10:20:50 10.10.2019 г. (UTC). Проведена оценка точности прогнозирования угла места, азимута и доплеровского сдвига частоты радиосигналов ТМИ по модели кругового возмущенного движения на интервале успешного приема в сравнении с моделью *SGP 4*. Показано, что абсолютные ошибки прогнозирования угла места и азимута не превосходили  $3^\circ$ , абсолютная ошибка прогнозирования доплеровского сдвига частоты радиосигналов телеметрии не превосходила 200 Гц, что является достаточным для успешного приема радиосигналов телеметрии и их декодирования.

Было проведено моделирование совместной работы сети трех разнесенных НСП (Минск, Брест, Могилев) по определению орбиты КА *Starlink-1143* в первую неделю полета. Этот КА был запущен 17 февраля 2020 г. в группировке из 60 спутников глобальной системы интернета. В первую неделю полета спутники в группировке имели близкие орбитальные параметры. Технология определения орбиты предполагала прием, обработку измерений частоты одного и того же радиосигнала ТМИ КА на трех синхронизированных НСП и идентификацию КА по базе данных орбитальных параметров системы *NORAD*. Моделировались доплеровский сдвиг  $\Delta f_{изм}$  принимаемой частоты радиосигнала ТМИ (с добавлением шума 100 Гц) КА *Starlink-1143* для двух моментов времени  $t_1$  и  $t_2$  по начальным данным в формате *TLE* и *SGP 4* модели. По базе данных системы *NORAD* для КА из запуска 17 февраля 2020 г. проводился расчет параметров пролета над НСП (угол места  $el_i$ , азимут  $az_i$ , наклонная дальность  $r_i$ , скорость изменения наклонной дальности  $dr_i/dt$ ) и характеристик радиосигналов телеметрии (доплеровский сдвиг частоты  $\Delta f_{расч.i}$ ) в  $i$ -й момент времени  $t_i$  ( $i = 1,2$ ). Идентификация КА проводилась при выполнении условий  $el_i > 0$  и  $|\Delta f_{расч.i} - \Delta f_{изм.i}| < 300$  Гц. В результате моделирования было получено, что даже при разности средних аномалий соседних КА в  $0.1^\circ$ , идентификацию КА в группировке можно осуществить по измерениям частоты одного и того же радиосигнала на трех синхронизированных НСП в один момент времени.

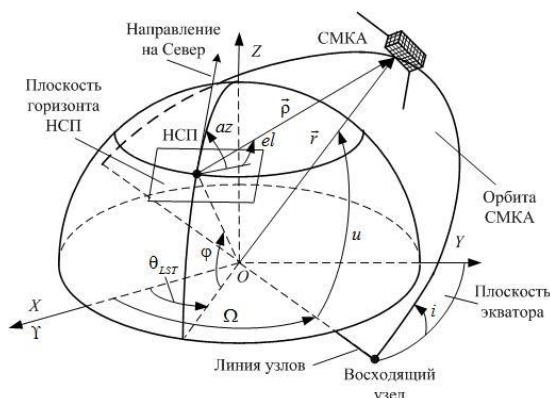


Рис. 3 Геометрия модели возмущенного кругового движения СМКА

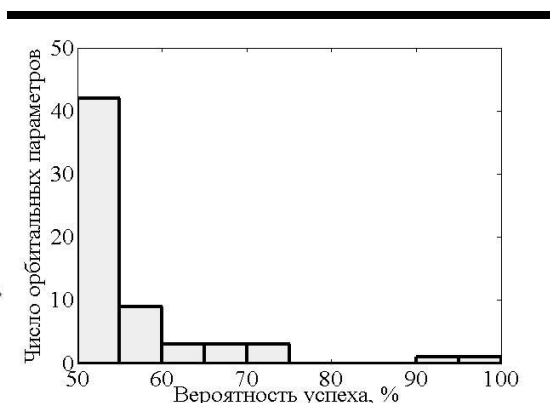


Рис. 4 Зависимость числа возможных орбитальных параметров от вероятности успеха  $\beta$

Совместный прием телеметрии и определения орбиты СМКА стационарным университетским НКУ и несколькими мобильными НСП с временной синхронизацией позволит использовать ресурсы разнесенных станций как для приема информации с СМКА, так и проведения измерений его орбитальных параметров. Это позволит увеличить географию приема, улучшить качество приема, самостоятельно получать орбитальные параметры и на практике обучать студентов технологиям приема ТМИ и определения орбит СМКА.



## Библиографический список

1. Fortescue P, Stark J and Swinerd G 2011 *Spacecraft Systems Engineering* (Chennai: John Wiley & Sons, Ltd.) p 724
2. Nieto-Peroy C and Emami M R 2019 *Appl. Sci.* **9**, 3110
3. Bouwmeester J and Guo J 2010 *Acta Astr.* **67** 854–62
4. Capderou M 2005 *Satellites Orbits and Missions* (Verlag Paris: Springer) p 544
5. Vallado D A 2013 *Fundamentals of Astrodynamics and Applications* (Hawthorne: Microcosm Press) p 1136
6. Wang R, Liu J and Zhang Q 2009 *Adv. Space Res.* **43** 1065–69
7. Спиридонов, А. А., Саечников В. А., Ушаков Д. В. // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10. – № 4. – С. 331–340
8. Sakamoto Y, Yotsumoto K, Sameshima K, Nishio M and Yasaka T 2008 *Acta Astronaut.* **62** 151–158
9. Rouzegar H and Ghanbarisabagh M 2019 *Wireless Pers.l Commun.* **108** 2195–2212

## ГОРНЫЕ РАБОТЫ И КАРЬЕРНЫЙ ТРАНСПОРТ – ОСНОВА СТРОИТЕЛЬСТВА ТРАНСПОРТНЫХ КОРИДОРОВ

**Тарасов Петр Иванович,**

ООО «Перспектива-М»,

г. Екатеринбург,

**Егоров Валерий Борисович,**

**Голубев Олег Ведимирович,**

E-Mail: [golubev\\_ov@mail.ru](mailto:golubev_ov@mail.ru),

Уральский государственный университет путей сообщения,

г. Екатеринбург

**Аннотация.** Российские железные дороги интегрированы с железнодорожными системами Европы и Восточной Азии. Наиболее протяженным транспортным коридором, проходящем по территории России, является Транссибирский (коридор «Восток-Запад»).

ОАО «РЖД» с каждым годом стремится улучшить свои конкурентные качества перед другими видами транспорта, а значит и увеличить грузопоток, что в свою очередь требует модернизации существующей инфраструктуры. Не редко модернизация существующей инфраструктуры оказывается затратнее строительства новых магистралей. Требуется поиск альтернативных путей. Одним из примеров является реализация проекта Северный широтный ход.

При строительстве железнодорожных путей требуется возведение земляного полотна. В районах Крайнего севера ощущается дефицит строительного грунта.

В статье предлагается использовать пустые породы Качканарского ГОКа для возведения земляного полотна. С учетом физико-механических свойств пустой породы необходимо рассмотреть очертание земляного полотна двухпутной линии по площади сопоставимой с однопутной линией, если бы она полностью возводилась из местных грунтов.

Положительный опыт использования пустой породы Качканарского ГОКа для сооружения земляного полотна Северного широтного хода позволил бы реализовать такие обсуждаемые проекты транспортных магистралей как «Белкомур» и Средне-Уральский широтный ход.

**Ключевые слова.** Транспортный коридор, пустые породы, отвал, Северный широтный ход, земляное полотно.

Анализ проведенных исследований развития железнодорожного транспорта в России показал, что наибольшее количество транспортных коридоров представлено направлениями, соединяющими Европу и Азию. Действительно азиатский регион является мировой фабрикой. Основные транспортные коридоры проходят через густонаселенные районы.

Наиболее протяженным транспортным коридором, проходящим по территории России, является Транссибирский (коридор «Восток-Запад»).

Этот коридор работает на пределе пропускной способности, требуя постоянных инвестиций в реконструкцию узких мест.

В этой связи для разгрузки коридора необходимо строить дополнительные участки транспортных магистралей, опираясь на районы с основным объемом зарождения грузопотока. К таким районам относится наша Сибирь.

Говоря словами М. В. Ломоносова: *«Российское могущество будет прирастать Сибирью...»*.

Это могущество не реализуемо без должного транспортного развития регионов Сибири. И в первую очередь необходимо обратить внимание не только на наличие месторождений полезных ископаемых, но и на условия, которые способствуют ускоренному освоению минерально-сырьевой базы в регионах.

С учетом особенностей данного региона – малая населенность, медленно восстанавливаемая природная среда и др., должны быть выполнены определенные требования к строительству транспортных магистралей – площадь, которую занимает транспортная магистраль, должна быть минимальной, малочисленный эксплуатационный штат, использование современных технологий и др. [1].

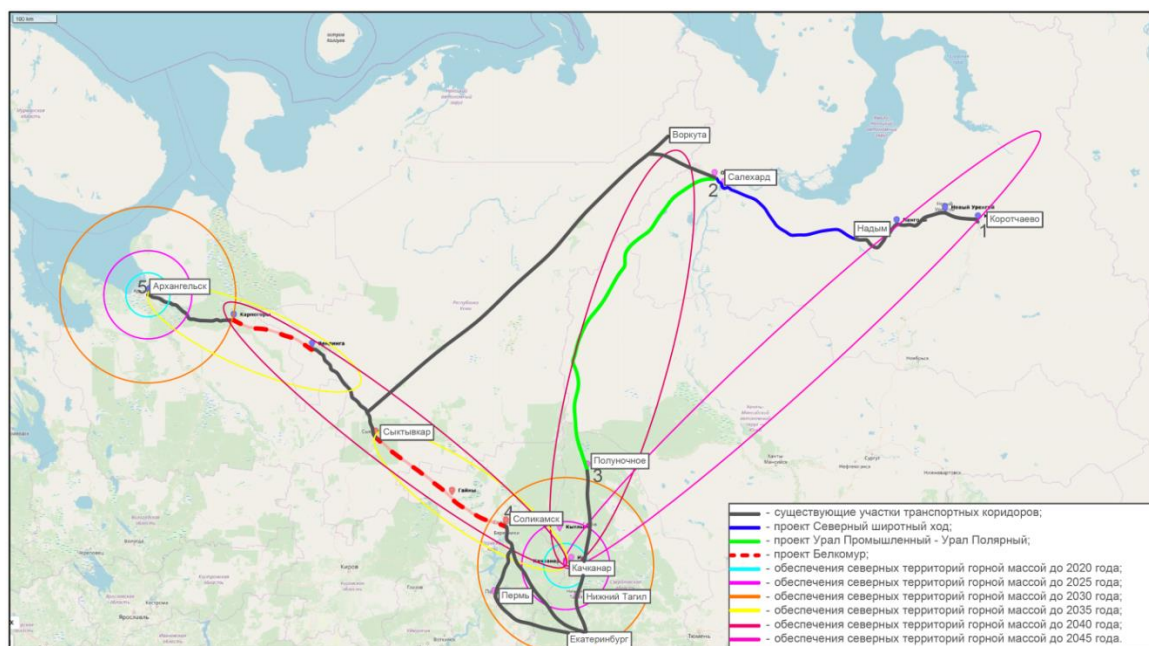


Рис. 1 Эллипсы обеспечения северных территорий горной массой

Реализация Северного широтного хода предполагает использование принципов государственно-частного партнерства, участником которого будет ОАО «РЖД».

Государственно-частное партнерство (ГЧП) – совокупность форм средне- и долгосрочного взаимодействия государства и бизнеса для решения общественно значимых задач на взаимовыгодных условиях [2].

Местные многолетнемерзлые грунты, в основном не пригодные для строительства песчаники и супесчаники, при оттаивании теряют несущую способность, отсутствуют грунты, пригодные для сооружения земляного полотна. Разведка карьеров подтвердила

наличие пылеватых песков только для отсыпки нижней части земляного полотна. Большая часть их запасов была использована при строительстве новой автомобильной дороги. Следовательно, необходимо предусматривать меры по доставке или гидронамыву дренирующего грунта [3]. К процессу гидронамыва следует отнестись с особой осторожностью, т. к. будет затронута столь ранимая природная среда региона.

Участок Северного широтного хода предполагает соединение однопутной линией ст. Обская (Северная железная дорога) с ст. Коротчаево (Свердловская железная дорога). Протяженность участка нового строительства (без мостов) составляет 457 км (из них 104 км закрепляется за ПАО «Газпром»).

Опыт строительства транспортных магистралей показывает, что необходимо сразу предусматривать строительство двухпутных линий, а с учетом конструктивных особенностей это особенно актуально. На рис. 2 представлено очертание земляного полотна, сложенного из скального грунта сразу под двухпутную линию с уклонами откосов 1:1 (синим), и из песчаных грунтов под однопутную линию с уклонами откосов 1:2 (черным). Как видно, площади, а значит и объемы строительного грунта, сопоставимы. Оставить однопутными лишь мостовые переходы через реки Обь и Надым.

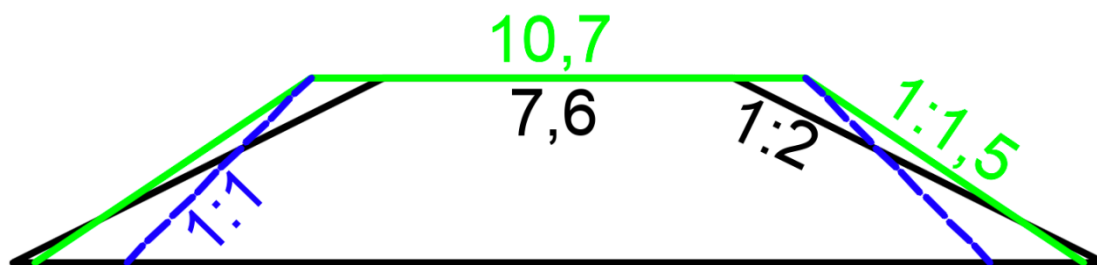


Рис. 2 Очертание насыпи из скальных и песчаных грунтов

При средней высоте насыпи 4 м объем необходимый для строительства земляного полотна составит около 27 млн м<sup>3</sup>. При объемном весе скального грунта 2 т/м<sup>3</sup> общая масса составит 54 млн т.

Посчитанный объем является меньшей частью уже существующих отвалов пустой породы Качканарского ГОКа.

Для перевозки пустой породы и дальнейшей выгрузки ее в промежуточные отвалы наилучшим образом подходят вагоны-самосвалы (думпкары). Перевозка будет осуществляться по существующей инфраструктуре ОАО «РЖД». Таким образом, компания ОАО «РЖД» могла бы в качестве доли своего участия предложить использование своей инфраструктуры.

Грузонапряженность линии Ульт-Ягун – Новый Уренгой составляет около 25 млн т. Значит, если перевезти необходимый объем пустой породы за 4 года, годовая грузонапряженность составит около 39 млн т. Одной из задач строительства Северного широтного хода является разгрузка Тюменского узла, а это значит, что даже при постоянных объемах производства предприятий Коротчаевского узла, будет уменьшение грузопотока, который пойдет в направлении Тюмени. Часть грузопотока будет направлена через Северный широтный ход. Поэтому после строительства Северного широтного хода первоначальное увеличение нагрузки на инфраструктуру будет выравнено последующим уменьшением грузопотока, что позволит отнести затраты капитального характера на восстановление на более поздний период.

Дополнительным положительным фактором использования скальных грунтов для отсыпки земляного полотна является сохранение грунтов основания в мерзлом состоянии. Скальный грунт будет способствовать дополнительному промерзанию в зимний период и сохранение мерзлого состояния в летний.

Положительный опыт использования пустой породы Качканарского ГОКа для сооружения земляного полотна Северного широтного хода позволил бы реализовать такие обсуждаемые проекты транспортных магистралей как «Белкомур» и Средне-Уральский широтный ход (с учетом примыкания по станции Картымская) [4].

Недавно в «Областной газете» в рубрике «Мы вместе» было представлено совместное решение трех Губернаторов: Куйвашева Е. В., Моора А. В. и Комаровой Н. В. о строительстве автомобильной дороги между г. Тавда и пос. Куминский за счет бюджетов трех областей и частных лиц. После окончания ее строительства образуется кратчайший путь от г. Тюмень до пос. Междуреченский (ст. Устье-Аха) и далее через новый автомобильный мост (над р. Конда) до г. Ханты-Мансийск.

Учитывая это решение, можно сделать вывод, что уже выбраны подрядчики, поставщики материалов и источники финансирования.

Однако через год-два, когда работы будут закончены, все эти «части сложного механизма» будут не нужны?! Нет, они будут нужны для строительства, не менее важной для всех трех областей, железной дороги между ст. Тавда и ст. Куминская (примерно в середине участка железной дороги ст. Войновка около г. Тюмень и ст. Тобольск) общей длиной около 90 км. Появление этой железной дороги позволит решить несколько важных задач, среди которых:

- Дублирование стратегически важной, но очень перегруженной дороги между ст. Екатеринбург и ст. Тюмень.

- Перенос с перегруженной дороги на новую дорогу от 10 до 20 млн т строительных и иных грузов ( по некоторым оценкам пока с главной дороги на север ст. Войновка ответвляется до 30 млн т грузов и фактически их все постепенно можно перевести на новую дорогу.

- Для большей части грузов, переводимых с главной дороги на новую, расстояние перевозки сократится на 180–200 км (будет исключен перегон ст. Егоршино – ст. Богданович и ст. Войновка – ст. Картымская), а также будут исключены две сортировочные станции (ст. Богданович и ст. Войновка), которые для этих грузов пока необходимы из-за двойной смены тяги на этих станциях.

- Новая дорога свяжет два огромных полигона с тепловозной тягой, а это кроме всего прочего, упростит организацию ремонта тепловозов в специализированном депо на ст. Егоршино.

С появлением новой дороги появится много новых примеров «бережливого производства», обусловленных появлением факторов 1–4.

С учетом возможной задержки строительства Северного широтного хода уже сейчас можно реализовать часть Средне-Уральского широтного хода (Картымская – Тавда), тем самым разгрузить узел Екатеринбург – Тюмень от будущей перевозки по нему 54 млн т.

УрГУПС на протяжении многих лет выполнял научно-исследовательские работы в сфере транспортного обеспечения. Одной из таких работ являлась – «Транспортное обеспечение Самотлорского и Советско-Сосьвинского месторождений нефти».

УрГУПС входит в состав членов Международной ассоциации транспортных университетов стран Азиатско-Тихоокеанского региона.

ФГБОУ ВО УрГУПС, как единственный в регионе транспортный ВУЗ готов взять на себя решение задач, связанных с развитием транспортной инфраструктуры в районах Крайнего Севера. С учетом всех особенностей данного региона, с использованием современных технологий в транспортном комплексе, в т. ч. с интеграцией различных видов транспорта.

Сегодня в УрГУПС и Уральском федеральном округе есть весь круг специалистов, способных решить необходимые задачи на данном этапе. Необходимо объединение усилий путем организации специальной рабочей группы при поддержке Правительства.

На основании вышеизложенного предлагается следующее.

1. Исследовать существующие отвалы пустой породы и грунты, из которых формируются новые отвалы Качканарского ГОКа на применимость для возведения земляного полотна в условиях Северного широтного хода.

2. Разработать ТЭО использования пустой породы Качканарского ГОКа для возведения земляного полотна в условиях Северного широтного хода с использованием существующей инфраструктуры ОАО «РЖД».

3. Внести необходимые изменения в существующий проект Северного широтного хода.

4. Разработать стратегию использования пустой породы, полученной от деятельности предприятий АО «ЕВРАЗ НТМК», в качестве строительного материала для перспективных транспортных магистралей страны.

5. Разработать на основе существующего опыта, экспериментов и моделирования специальные технические условия на проектирование транспортных магистралей с использованием отходов производства горно-обогатительных комбинатов.

6. Использовать специализированный комплекс по разборке отвалов пустых пород и для строительства транспортных магистралей в условиях приполярных районов.

7. Рассмотреть возможность создания международной корпорации (дочернего предприятия ЕВРАЗ-Холдинга) по ликвидации и применения отходов горного и металлургического производства.

Кризис – это наилучшее время для реализации самых амбициозных проектов.

#### Библиографический список

1. Аккерман, Г. Л. Сухопутная мультимодальная транспортная система приполярных областей России / Г. Л. Аккерман, П. И. Тарасов, С. Г. Аккерман, О. В. Голубев [и др.] // Транспорт Урала. – 2017. – № 4 (55). – С. 15–20.

2. Государственно-частное партнерство [Электронный ресурс] / [https://ru.wikipedia.org/wiki/Государственно-частное\\_партнерство](https://ru.wikipedia.org/wiki/Государственно-частное_партнерство) (дата обращения 15.04.2020).

3. Конюхов, А. П. История и перспективы северного широтного хода / А. П. Конюхов, С. В. Шкурников, Л. А. Богданова // «Железнодорожный транспорт». – 2019. – № 12. – С. 54–57.

4. Евдокимов, П. А. Запад-Восток: объединяя страны и континенты. Интервью. 18 апреля 2014 года / П. А. Евдокимов, В. Т. Беда // Дороги и люди. – 2014. – № 4 (57). (<http://www.uralgiprotrans.ru/ru/news/21>).

### ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕКОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

**Фирстов Александр Петрович,**

E-Mail: [first55@mail.ru](mailto:first55@mail.ru),

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

**Аннотация.** Направлением исследования является установление закономерностей протекания физических и физико-химических процессов при формировании структуры, с последующим проявлением свойств жидкостекольных смесей, и с дальнейшей реализацией управления их свойствами.

**Ключевые слова.** Жидкое стекло, структурные элементы, свойства смесей.

На производстве технологи сталкиваются с малообъяснимыми, а иногда и противоречивыми фактами по вопросу получения тех или иных свойств жидкостекольных смесей при использовании определенного вида жидкого стекла. Существующие представления о структуре жидкого стекла не объясняют данные явления, т. е. техническая литература не однозначно трактует наноструктуру жидкого стекла, которая может помочь разъяснить закономерности получаемых свойств жидкостекольных смесей [1, 2].

Отверждение жидкого стекла химическим путем происходит за счет введения в раствор кислого реагента, в любом агрегатном состоянии. Существует много реагентов, которые могут быть инициаторами отверждения: углекислый газ – при  $\text{CO}_2$ -процессе; фурановые или эпоксидные смолы с продувкой диоксидом серы –  $\text{SO}_2$ -процесс; диметтиламин, триэтиламин – амин-процесс; фенольная щелочная смола – Бета-сет-процесс; сложные эфиры органических кислот – альфа-сет- процесс; ферросилиций – нишияма-процесс; феррохромовый шлак или нефелиновый шлак – ПСС-процесс; мочевиноформальдегидные смолы – ЖСС- процесс и др [2–4].

В растворах силикатов степень полимеризации анионов, пористость геля, размер частиц, пластичность жидкого стекла, как известно, зависит от силикатного модуля, концентрации раствора и количества структурных элементов.

Количественное наличие структурных элементов в жидкостекольной системе будет рассмотрено на примере  $\text{CO}_2$ -процесса.

Применять  $\text{CO}_2$ -процесс некоторые авторы предлагают во всем, используемом в литейном производстве, диапазоне, т. е. от модуля  $M = 2,0$  до  $3,0$  [4, 6]. Другие авторы [2, 7, 8] дают предпочтение низкомодульному жидкому стеклу, т. е.  $M = 2,0 \div 2,3$ , иные авторы [3, 9–11] склоняются к применению высокомодульного жидкого стекла, т. е.  $M = 2,6 \div 3,0$ , а еще ряд авторов [5, 12–14] делают выбор на применении жидкого стекла по  $\text{CO}_2$ -процессу со средним модулем, т. е.  $M = 2,4 \div 2,6$ . Достигнуть положительных результатов в области применения жидкого стекла для получения качественной отливки можно лишь внеся ясность в сложные процессы, которые протекают в формовочных и стержневых смесях.

Для расчета компонентов жидкого стекла в растворе взяты натриевые жидкие стекла с содержанием  $\text{Na}_2\text{O} = 10,0 \div 14,0$  %, и с модулем равным  $2,0$ ;  $2,3$ ;  $2,6$  и  $3,0$  (ГОСТ 13078–81. Стекло натриевое жидкое. Технические условия).

Принимая во внимание, что натриевое жидкое стекло является молекулярным раствором, а его строение соответствует формуле дигидроортосиликата натрия:  $\text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4$  [2, 6, 10], то на постройку молекулы нужно равное количество оксидов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и воды, т. е.  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

Для расчетов необходимо перевести процентную концентрацию компонентов в весовую ( $C_v$ , г/литр) и молярную ( $M$ , моль/литр) по формулам

$$C_d = C_{\%} \cdot 10 \cdot \rho \quad \text{и} \quad M = \frac{C_{\%} \cdot 10 \cdot \rho}{M_g} \quad (1)$$

где  $C_{\%}$  – процентная концентрация,  $M_v$  – молярный вес вещества, у.е.,  $\rho$  – плотность раствора, г/л.

Перевод процентного соотношения в весовую концентрацию для выбранных жидких стекол необходим для построения диаграмм.

За основу расчетов взято изменение весовых концентраций компонентов для различных процентов оксида натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) при определенных модулях жидкого стекла.

По полученным данным можно построить диаграммы соотношений структурных компонентов: рис. 1, а – для  $\text{Na}_2\text{O} = 10$  %; рис. 1, б – для  $\text{Na}_2\text{O} = 12$  %; рис. 1, в – для  $\text{Na}_2\text{O} = 13$  % и рис. 1, г – для  $\text{Na}_2\text{O} = 14$  %.

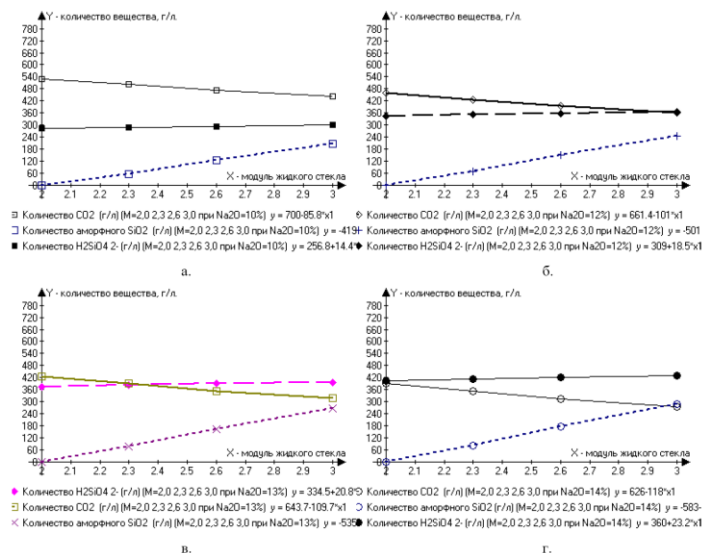


Рис. 1 Соотношение структурных компонентов в жидком стекле с различным содержанием оксида натрия (Na<sub>2</sub>O): а – 12 %; б – 13 %; в – 14 %, при различном модуле

Из диаграммы соотношений компонентов видно, что при модуле жидкого стекла равным двум свободного оксида кремния не будет [9, 10], т. к. эквивалентные соотношения оксидов идут на постройку молекулы дигидроортосиликата натрия, а оставшийся оксид натрия, равный оксиду натрия, идущего на постройку молекулы, пойдет на образование вторичных структур, впоследствии, при добавлении кислого реагента, он будет формировать ядро мицеллы (рис. 2).

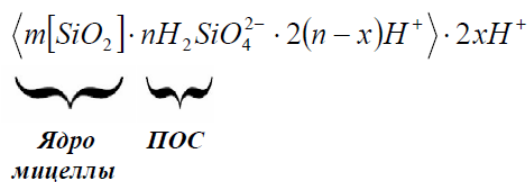


Рис. 2 Формула образующейся мицеллы кремниевой кислоты Na<sub>2</sub>H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>

При модуле жидкого стекла  $M > 2$  в растворе должны одновременно присутствовать как соль кремниевой кислоты (Na<sub>2</sub>H<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), так и свободные частицы SiO<sub>2</sub>, т. е. аморфный кремнезем [5, 10], не участвующий при формировании ядра и потенциалопределяющим слоя (ПОС) мицеллы, будет являться как бы балластом. Увеличение свободного кремнезема с повышением модуля жидкого стекла повышает вязкость раствора и дает эффект конуса Тиндаля, оставаясь молекулярным раствором.

Повышение модуля жидкого стекла приводит к резкому снижению содержания воды в растворе и увеличению свободного кремнезема, при этом нарастание соли кремниевой кислоты идет незначительно. Увеличение оксида натрия в растворе приводит к тому, что при Na<sub>2</sub>O = 13 % процентное содержание воды окажется ниже соли кремневой кислоты, т. е. выше модуля  $M > 2,3$ , а при содержании Na<sub>2</sub>O = 14 % количество воды находится ниже всего диапазона соли кремниевой кислоты, находящейся в растворе.

Из изложенного следует, что повышение концентрации свободного кремнезема, за счет пониженного количества воды уменьшает время отверждения, т. е., чем больше концентрация вещества в системе, тем чаще сталкиваются молекулы между собой [2, 3, 6, 10]. Это, в свою очередь, приведет к образованию пористой третичной структуре.

Процесс увеличения вторичных и образования пористого структурного каркаса в результате сцепления частиц дисперсной фазы, сопровождается увеличением прочности системы [4, 11]. Увеличение прочностных характеристик объясняется тем, что при модуле жидкого стекла  $M = 2,0$  на поверхности образующейся структуры доминируют только

силы Дебая, то в высокомолекулярных стеклах, за счет внедрения воды в поры и капилляры структуры, возникают более прочные силы Кеезома (диполь-дипольное притяжение, между молекулами воды) и водородные силы (разновидность сил Дебая). При этом в высокомолекулярном стекле и так мало воды по сравнению с низкомолекулярным стеклом, но и та малая часть уходит внутрь формирующейся структуры, и, как следствие, поверхность высокомолекулярных смесей имеет высокую осыпаемость, склонность к возникновению пригара [12], а с течением времени дальнейшее применение высокомолекулярных смесей затруднительно из-за разупрочнения его при хранении.

Таким образом, высокое содержание оксида натрия  $\text{Na}_2\text{O}$  выше 13 % и высокомолекулярное стекло, выше  $M > 2,6$  ведет к ухудшению свойств формовочных и стержневых смесей.

Данные исследования подтверждают данные авторов [13–15], что качественный скачок в жидкостекольной системе наступает при модуле  $M = 2,5 \div 2,6$ , т. е. появление разветвленной и трехмерной структуры.

Оптимальные значения по применению в литейном производстве лежат при значениях жидких стекол в интервале: по модулю  $M = 2,3 \div 2,6$ ; и с содержанием оксида натрия в пределах 11,0 ÷ 13,0 %.

#### Библиографический список

1. Боровский Ю. Ф. Формовочные и стержневые смеси / Ю. Ф. Боровский, М. И. Шадских. – Ленинград : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1980. – 86 с.
2. Жуковский С. С. Технология литейного производства: формовочные и стержневые смеси / С. С. Жуковский. – Брянск : Издательство БГТУ, 2002. – 469 с.
3. Могилев В. К. Справочник литейщика / В. К. Могилев, О. И. Лев. – Москва : Машиностроение, 1988. – 272 с.
4. Илларионов И. Е. Жидкостекольные смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом / И. Е. Илларионов, Н. В. Петрова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2011. – № 2. – С. 208–213.
5. Корнеев В. И. Производство и применение растворимого стекла / В. И. Корнеев, В. В. Данилов. – Ленинград : Стройиздат, 1991. – 177 с.
6. Мамина Л. И. Формовочные материалы : учеб. пособие / Л. И. Мамина, Б. А. Кулаков. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – 344 с.
7. Кукуй Д. М. Теория и технология литейного производства / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, В. Н. Эскетова. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 416 с.
8. Голофаев А. Н. Технология литейной формы : учеб. пособие / В. И. Лагута, Г. В. Хинчагов. – Луганск : Изд-во СНУ 2001 – 264 с.
9. Денисов И. С. Литейные формы и их сборка : учебное пособие для проф.-тех. уч-щ / И. С. Денисов. – Москва : Высшая школа, 1970. – 256 с.
10. Технология литейного производства : учебник для вузов / Б. С. Чуркин, Э. Б. Гофман, С. Г. Майзель [и др.] ; под ред. Б. С. Чуркина. – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 2000. – 662 с.
11. Справочник по чугунному литью / под ред. д-ра техн. наук проф. Н. Г. Гиршовича. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва ; Ленинград : Машгиз. [Ленингр. отд-ние], 1960. – 800 с.
12. Литейное производство : учебник для металлургических специальностей вузов / под ред. А. М. Михайлова. – Москва : Машиностроение, 1987. – 256 с.
13. Аксенов П. Н. Технология литейного производства / П. Н. Аксенов. – Москва : Машгиз, 1957. – 645 с.
14. Справочник литейщика / под ред. Н. Н. Рубцова. – Москва : Машгиз, 1961. – 305 с.
15. Айлер Р. К. Химия кремнезема. Т. 2 / Р. К. Айлер. – Москва : Мир, 1982. – 752 с.



# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИБЛИОТЕКИ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СЕРВЕРА АВТОРИЗАЦИИ

Юрина Наталья Вадимовна,  
Блинков Олег Геннадьевич,  
E-Mail: o.g.blinkov@urfu.ru,  
Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Предоставление доступа к защищенным ресурсам при необходимости передавать третьей стороне персональные данные пользователя является проблемой на многих предприятиях. Использование сторонних серверов не всегда надежно и зачастую обходится довольно дорого. Создание собственного сервера авторизации позволит избежать подобных проблем. Разработан сервер авторизации, который позволяет получать необходимую информацию, используя только токен доступа. Он имеет минимальную функциональность, которая в дальнейшем может быть расширена или настроена под нужды конкретного предприятия.

**Ключевые слова.** C#, ASP.NET Core, OAuth, Авторизация, Токен доступа, OpenIddict.

## 1. Введение

Данные и информация – одни из наиболее ценных и важных ресурсов для любой современной компании. Все более часто появляются новости о несанкционированном доступе к тем или иным сайтам и базам данных. Пользователи таких ресурсов несут большие потери в виде своих персональных данных, а плата компании за необеспеченную безопасность ресурсов может оказаться крайне высокой. Именно поэтому нужно обеспечить наиболее защищенный способ передачи персональных данных сторонним приложениям. Один из способов реализации защиты – это создание собственного сервера авторизации, который позволяет предусмотреть необходимые меры безопасности при работе с информацией [1].

Для реализации сервера использован протокол OAuth 2.0, который является стандартным протоколом авторизации, позволяющим выдать одному приложению права на доступ к ресурсам пользователя на другом сервисе [2, 3]. А также библиотека с открытым исходным кодом OpenIddict [4]. OpenIddict – это расширение для платформы ASP.NET Core, которое предназначено для управления потоком запросов аутентификации. Оно хорошо зарекомендовало себя во множестве Интернет-проектов.

Общий принцип работы с сервером авторизации:

Обращение к серверу за токеном доступа;

Получение защищенных ресурсов, используя полученный ключ.

Результатом авторизации приложения является токен доступа – ключ, предъявление которого является пропуском к защищенным ресурсам. Обращение к ним происходит через HTTP-запрос с указанием в заголовке или в качестве одного из параметров полученного токена доступа.

### 1.1. Создание нового приложения

Создаем новое веб-приложение ASP.NET Core с пустым шаблоном в VisualStudio 2019 [5].

После того как приложение создано, необходимо в консоли диспетчера пакетов набрать следующие команды, чтобы добавить пакеты необходимые для использования библиотеки OpenIddict:

```
>dotnet add package OpenIddict --version 2.0.0-rc3-final [6]
```

```
>dotnet add package OpenIddict.EntityFrameworkCore --version 2.0.0-rc2-final [7]
```

### 1.2. Добавление промежуточного слоя

Пустой шаблон проекта создает необходимые папки и файлы для запуска простейшего приложения. Openiddict зависит от ПО промежуточного слоя модели MVC [8]. Поэтому следует обновить методы ConfigureServices класса Startup, чтобы зарегистрировать сервисы MVC, и Configure, чтобы добавить промежуточный слой. Startup класс должен выглядеть следующим образом:

```
1. public class Startup
2. {
3.     public Startup(IConfiguration configuration)
4.     Configuration = configuration;
5. }
6. public IConfiguration Configuration { get; }
7. public void ConfigureServices(IServiceCollection services)
8. {
9.     services.AddMvc();
10. }
11. public void Configure(IApplicationBuilder app, IHostingEnvironment env)
12. {
13.     if (env.IsDevelopment())
14.     {
15.         app.UseDeveloperExceptionPage();
16.     }
17.     app.UseMvcWithDefaultRoute();
18. }
19. }
```

### 1.3. Настройка подключения базы данных

В данном проекте используется свободная реляционная система управления базами данных MySQL [9] и объектно-ориентированная технология доступа к данным EntityFrameworkCore [10].

Чтобы взаимодействовать с базой данных через EntityFramework нам нужен контекст данных – класс, унаследованный от класса Microsoft.EntityFrameworkCore.DbContext. Поэтому в папку Models добавляется новый класс, который назовем AuthenticationServerContext:

```
1. public class AuthenticationServerContext : IdentityDbContext<ApplicationUser>
2. {
3.     public AuthenticationServerContext(DbContextOptions options)
4.     : base(options) { }
5. }
```

Чтобы подключиться к базе данных, необходимо задать параметры подключения. Для этого изменяется файл appsettings.json, с добавлением в него определение строки подключения:

```
1. {
2.     "ConnectionStrings":
3.     {
4.         "AuthenticationServerContext": "server=127.0.0.1;uid=root;password=1;database=
oauth;"
5.     },
6. }
```

И последним шагом в настройке проекта является изменение файла Startup.cs. В нем нам надо добавить в метод ConfigureServices() следующие строки:

```
1.     services.AddDbContext<AuthenticationServerContext>(options =>
2.     {
3.     options.UseMySQL(configuration.GetConnectionString("AuthenticationSer
verContext"));
4.     options.UseOpenIddict();
5.     });
```

#### 1.4. Создание базы данных

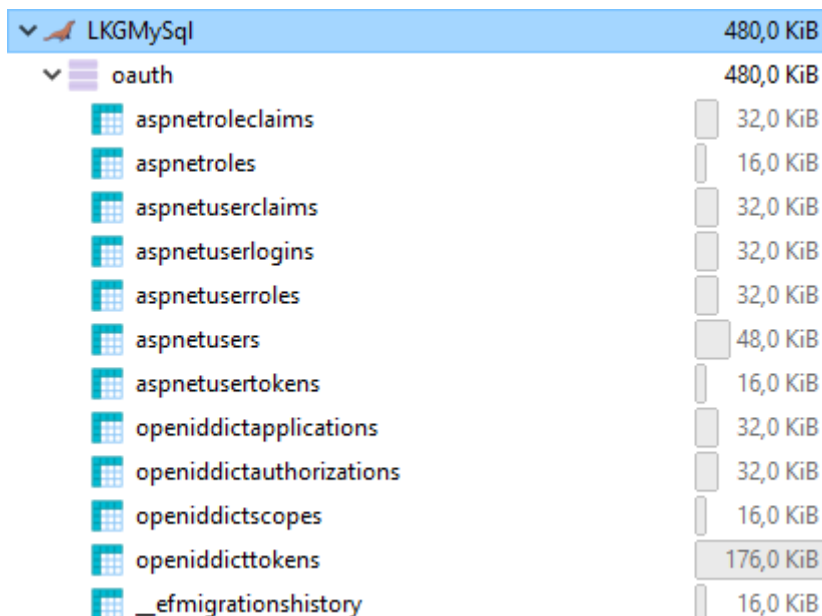
Следующим шагом необходимо создать фактическую базу данных для контекста базы данных. Для этого сначала добавляем миграцию базы данных:

```
>dotnet ef migrations add AuthenticationServerContext
```

А затем на основе этой миграции выполняем обновление самой базы данных:

```
>dotnet ef database update
```

Как только команда будет выполнена, в базу данных добавится следующий набор таблиц:



Database	Schema	Table	Size (KiB)
LKGMySQL	oauth	aspnetroleclaims	32,0
LKGMySQL	oauth	aspnetroles	16,0
LKGMySQL	oauth	aspnetuserclaims	32,0
LKGMySQL	oauth	aspnetuserlogins	32,0
LKGMySQL	oauth	aspnetuserroles	32,0
LKGMySQL	oauth	aspnetusers	48,0
LKGMySQL	oauth	aspnetusertokens	16,0
LKGMySQL	oauth	openiddictapplications	32,0
LKGMySQL	oauth	openiddictauthorizations	32,0
LKGMySQL	oauth	openiddictscopes	16,0
LKGMySQL	oauth	openiddicttokens	176,0
LKGMySQL		_efmigrationshistory	16,0

Рис. 1 Таблицы, добавленные в базу данных

#### 1.5. Регистрация промежуточного ПО

Следующим шагом осуществляем регистрацию промежуточного ПО. Добавим регистрацию сервисов, требуемых OpenIddict. Для этого обновим метод ConfigureServices, чтобы зарегистрировать службы аутентификации.

```
1.     services.AddDbContext<AuthenticationServerContext>(options =>
2.     {
3.     options.UseMySQL(configuration.GetConnectionString("AuthenticationSer
verContext"));
4.     options.UseOpenIddict();
5.     });
6.     services.AddOpenIddict()
7.     .AddCore(options =>
8.     {
9.     options.UseEntityFrameworkCore()
10.    .UseDbContext<AuthenticationServerContext>());
11.    });
12.    .AddServer(options =>
```

```

13.  {
14.  options.EnableAuthorizationEndpoint("/connect/authorize")
15.  .EnableTokenEndpoint("/connect/token")
16.  .EnableUserInfoEndpoint("/api/userinfo");
17.  options.RegisterScopes(OpenIdConnectConstants.Scopes.Profile);
18.  options.AllowAuthorizationCodeFlow()
19.  .AllowRefreshTokenFlow();
20.  options.EnableRequestCaching();
21.  options.DisableHttpsRequirement();
22.  options.SetAuthorizationCodeLifetime(TimeSpan.FromMinutes(10));
23.  options.SetAccessTokenLifetime(TimeSpan.FromMinutes(10));
24.  options.SetRefreshTokenLifetime(TimeSpan.FromHours(12));
25.  options.UseMvc();
26.  })
27.  .AddValidation();

```

Секция `.AddCore` позволяет указать параметры подключения базы данных, переопределить стандартные сущности `OpenIdDict`.

В секции `.AddServer` определяют конечные точки приложения, методы получения токена, срок жизни каждого из токенов и данные пользователя, доступные для приложения.

Секция `.AddValidation` добавляет стандартную валидацию, которую при необходимости можно сменить на пользовательскую.

### ***1.6. Создание конечных точек приложения***

Сервер авторизации не будет работать на этом этапе, так как не реализована фактическая конечная точка авторизации. В папку `Controllers` добавим класс `AuthorizationController`. Добавим метод `Authorize`, который будет обрабатывать запрос с маршрутом `/connect/authorize`, определенный для конечной точки авторизации `OpenIdDict`:

```

1.  [Authorize, HttpGet("~/connect/authorize")]
2.  public async Task<IActionResult> Authorize([ModelBinder(typeof(Open
OpenIdDictMvcBinder))] penIdConnectRequest request)
3.  {
4.  var application = await applicationManager.FindByClientIdAsync(request
.ClientId, HttpContext.RequestAborted);
5.  if (application == null)
6.  {
7.  return View("Error, new ErrorViewModel
8.  {
9.  Error = OpenIdConnectConstants.Errors.InvalidClient,
10.  ErrorDescription = "Детали, соответствующие вызываемому клиентск
ому приложению не найдены в базе данных"
11.  });
12.  }
13.  var user = await userManager.GetUserAsync(User);
14.  if (user != null)
15.  {
16.  var authorize = await authorizationManager.FindBySubjectAsync(user.Id)
;
17.  if (authorize.Length != 0)
18.  {
19.  var ticket = await CreateTicketAsync(request, user);
20.  return SignIn(ticket.Principal, ticket.Properties, ticket.AuthenticationSche
me);

```

```

21.     }
22.     }
23.     return View(new AuthorizeViewModel
24.     {
25.         ApplicationName = application.DisplayName,
26.         RequestId = request.RequestId
27.     });
28.     }

```

Следующий метод с именем Exchange доступный по маршруту /connect/token для обработки запросов конечной точки токена OpenIddict:

```

1.     [HttpPost("~/connect/token"), Produces("application/json")]
2.     public async Task<IActionResult> Exchange([ModelBinder(typeof(OpenI
ddictMvcBinder))] OpenIdConnectRequest request)
3.     {
4.         if (request.IsAuthorizationCodeGrantType())
5.         {
6.             var info = await HttpContext.AuthenticateAsync(OpenIddictServerDefault
s.AuthenticationScheme);
7.
8.             var user = await userManager.GetUserAsync(info.Principal);
9.             if (user == null)
10.            {
11.                return BadRequest(new OpenIdConnectResponse
12.                {
13.                    Error = OpenIdConnectConstants.Errors.InvalidGrant,
14.                    ErrorDescription = "Срок действия авторизационного кода истек"
15.                });
16.            }
17.            if (!await signInManager.CanSignInAsync(user))
18.            {
19.                return BadRequest(new OpenIdConnectResponse
20.                {
21.                    Error = OpenIdConnectConstants.Errors.InvalidGrant,
22.                    ErrorDescription = "Пользователь больше не может войти в систему"
23.                });
24.            }
25.            var ticket = await CreateTicketAsync(request, user, info.Properties);
26.            return SignIn(ticket.Principal, ticket.Properties, ticket.AuthenticationSche
me);
27.        }
28.        return BadRequest(new OpenIdConnectResponse
29.        {
30.            Error = OpenIdConnectConstants.Errors.UnsupportedGrantType,
31.            ErrorDescription = "Указанный тип авторизации не поддерживается"
32.        });
33.    }

```

Таким образом, поставленная нами задача создания сервера авторизации на основе библиотеки с открытым исходным кодом OpenIddict выполнена. Разработана пошаговая инструкция для реализации собственного приложения на платформе ASP.NET Core, приведены необходимые расширения и дополнения. Следует отметить, что в дальнейшем данный сервер может применяться на сайтах для авторизации приложений посредством

протокола OAuth. OAuth – простой стандарт авторизации, основанный на базовых принципах интернета, что делает возможным применение авторизации практически на любой платформе. Сервер реализует базовые методы, необходимые для минимальной работы, которые могут быть расширены или настроены в соответствии с потребностями конкретного предприятия. Стандарт имеет поддержку крупнейших площадок и очевидно, что его популярность будет только расти.

#### Библиографический список

1. D. Hardt, Ed. The OAuth 2.0 Authorization Framework. Microsoft, 2012.
2. Microsoft .NET Core 2.0. <https://dotnet.microsoft.com/download/dotnet-core/2.0>. Дата посещения 10 ноября 2019.
3. OAuth 2.0. <https://oauth.net/2>. Дата посещения 05 ноября 2019.
4. Openiddict/openiddict-documentation. <https://github.com/openiddict/openiddict-documentation>. Дата посещения 10 ноября 2019.
5. Microsoft | Visual Studio Documentation. <https://docs.microsoft.com/ru-ru/visualstudio/ide/quickstart-aspnet-core?view=vs-2019>. Дата посещения 06 ноября 2019.
6. OpenIddict.Core. <https://www.nuget.org/packages/OpenIddict.Core/2.0.0-rc3-fina>. Дата посещения 09 ноября 2019.
7. OpenIddict.EntityFrameworkCore. <https://www.nuget.org/packages/OpenIddict.EntityFrameworkCore/2.0.0-rc2-fina>. Дата посещения 01 ноября 2019.
8. Microsoft | .NET. <https://docs.microsoft.com/ru-ru/aspnet/core/fundamentals/middleware/?view=aspnetcore-3.0>. Дата посещения 07 ноября 2019
9. MySQL. <https://www.mysql.com>. Дата посещения 03 ноября 2019.
10. Aspnet/EntityFrameworkCore. <https://github.com/aspnet/EntityFrameworkCore>. Дата посещения 06 ноября 2019.

# **Металлургическое производство**

## ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ УПРОЧНЕНИЯ С ОТДЕЛЬНОГО И ПРОКАТНОГО НАГРЕВОВ СТАЛЬНЫХ ШАРОВ ДЛЯ ШАРОВЫХ МЕЛЬНИЦ

Алимов Валерий Иванович,

E-Mail: [alim41@mail.ru](mailto:alim41@mail.ru),

Штыхно Алла Петровна,

E-Mail: [shtixno@mail.ru](mailto:shtixno@mail.ru),

Донецкий национальный технический университет,

Передерий Игорь Александрович,

ПАО Донецкий металлопрокатный завод

**Аннотация.** Изучено влияние параметров охлаждения с отдельного и прокатного нагревов для упрочнения стальных мелющих шаров из стали 65Г, используемой для шаровых мельниц. Выполнен теплотехнический расчет охлаждения стальных заготовок и показано, что теоретические расчеты не всегда верны и требуют корректировки. Установлено, что регулированием скорости охлаждения можно управлять конечной структурой и свойствами стали.

**Ключевые слова.** Стальные шары, режимы упрочнения, нагревы и параметры, структура, свойства, шаровые мельницы.

В переработке руд на горно-обогатительных комбинатах важное место занимают операции их измельчения, которые составляют больше половины всех материальных затрат производства. Измельчение проводят в мельницах с использованием в качестве активных элементов металлических мелющих тел, чаще всего – шаров. Вследствие постоянного контакта с материалом, который измельчается, мелющие шары подвергаются интенсивному износу, что при низкой стойкости вынуждает горно-обогатительный комплекс компенсировать их износ за счет приобретения новых тел. Вместе с тем, большие потери, вызванные невысоким качеством шаров, связаны со снижением добычи полезного компонента из руды, приводят к увеличению энергетических и эксплуатационных затрат на тонну готовой продукции. Все эти расходы повышают себестоимость продукции горно-обогатительного комплекса, вызывая удорожание концентрата – базового для металлургической и машиностроительной отраслей продукта. Те же проблемы характерны и для энергетической, цементной, строительной и других отраслей, которые используют операцию измельчения при переработке своего сырья [1].

Из анализа опубликованных данных [1–7] установлено, что стальные мелющие шары, которые изготавливаются отечественной промышленностью, имеют в целом невысокую и неравномерную по поверхностную твердость, малую глубину закалки, повышенную склонность к расколу в мельницах, в результате чего в 3–5 раз уступают аналогичным зарубежным продуктам.

Важная роль при изготовлении стальных мелющих шаров принадлежит таким технологическим свойствам стали, как способность к хрупкому разрушению, коррозионно-абразивный износ, малая глубина закаленного слоя, которые в значительной степени зависят от режима термической обработки и полученной структуры. Структура, обусловленная химическим составом металла и режимом охлаждения, наряду с другими факторами (величиной зерна аустенита, наличием внутренних напряжений) является характеристикой, знание которой необходимо для оценки работоспособности мелющих шаров.

Термическая обработка мелющих шаров, которая включает тепловое воздействие на металл, определяет различные изменения формирования структуры, фазового состояния, напряженного состояния и соответственно свойств, величины и распределения микро- и макронапряжений, которыми можно управлять. Деформационно-термическая обработка может быть использована с целью повышения прочности стальных шаров



с использованием тепла прокатного нагрева, в основном углеродистых и низколегированных сталей [2, 3, 6]. Использование тепла прокатки для проведения деформационно-термической обработки позволяет значительно сократить энерго- и трудозатраты.

Целью данной работы является изучение влияния параметров охлаждения мелющих шаров с использованием тепла прокатного нагрева на структуру и свойства стали 65Г для изготовления шаров диаметром 40 и 60 мм 3 и 4 групп прочности (ГОСТ 3499–97) для шаровых мельниц и повышение их качества.

Исследования проводились на образцах заготовок проката из стали 65Г диаметром 60 мм и длиной 70–80 мм, из которой планируется производство стальных мелющих шаров диаметром 40 и 60 мм для шаровых мельниц 3 и 4 групп на шаропрокатном стане ПАО «ДМПЗ». Шары 3 и 4 групп должны на поверхности иметь твердость не менее HRC 55, а 4 группы на глубине  $\frac{1}{2} R$  не менее HRC 45. Образцы заготовок были отобраны на этом же предприятии для отработки сравнительного режима термической обработки закалки при разной продолжительности охлаждения в воде с самоотпуском и отпуском с отдельного нагрева. Порезка заготовок производилась в условиях механической лаборатории на ПАО «ДМПЗ» на отрезном станке с охлаждением.

Химический анализ образцов, который представлен в табл. 1, выполняли на квантометре ARL-3000 в условиях ЦКЛ ПАТ «ДМЗ».

Таблица 1

Химический состав исследуемой стали 65Г для мелющих шаров, % масс.

Элемент, %	C	Ni	Si	Mn	Cr	P	S	Cu
Содержание элементов по ГОСТу	0,60–0,7	До 0,25	0,17–0,37	0,9–1,2	До 0,25	До 0,035	До 0,035	До 0,2
Фактический химанализ	0,64	0,12	0,28	0,96	0,15	0,022	0,018	0,26

Макроструктуру исходной заготовки, а именно химическую неоднородность (ликвации), трещины, поры, раковины, выявляли глубоким и поверхностным травлением с помощью оптических приборов при увеличении до 50 раз. Оценка дефектов проводилась согласно ГОСТ 10243.

Микроструктурные исследования проводили в условиях лаборатории ДонНТУ на микроскопе «Neophot-21» при увеличении  $\times 100$ . Фотографирование проводили при увеличениях  $\times 250$  и  $\times 500$  на микроскопе с помощью камеры с последующей обработкой фотографий на компьютере в программе *Adobe Photoshop 7.0* и *Image Tool*.

На полученных фотографиях оценили размер зерна и определили объемную долю мартенсита и тростита в стали для оценки глубины прокаливаемости стали (50 % мартенсита).

Измерение твердости по сечению образцов производили на приборе Роквелла (ТК-2М), по шкале С. Микроструктуру и твердость образцов изучали по сечению по схеме, приведенной на рис. 1.

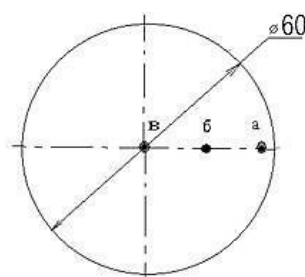


Рис. 1 Схема изучения микроструктуры и измерения твердости по сечению образцов

Для назначения продолжительности охлаждения в воде с температуры закалки и температуры самоотпуска образцов выполняли теплотехнический расчет охлаждения заготовок диаметром 60 мм по сечению согласно численному методу решения дифференциального уравнения теплопроводности.

Экспериментальные режимы термической обработки заготовок выполняли в термической лаборатории кафедры физического материаловедения ДонНТУ. Нагрев образцов под закалку и отпуск проводили в печах СНОЛ 1,6.2,5.1 / 11 (600) по следующим режимам:

- а) закалка с  $790 \pm 10$  °С, выдержка 90 мин, полное охлаждение в воде;
- б) закалка с  $790 \pm 10$  °С, выдержка 90 мин, охлаждение образцов в воде 20 с, 30 с и 60 с, далее на воздухе, отпуск при 250–270 °С, выдержка 3 ч, охлаждение на воздухе;
- в) закалка с  $790 \pm 10$  °С, выдержка 90 мин, охлаждение в воде 60 с, далее отпуск в печи при 250–270 °С, выдержка 3 ч, далее на воздухе;
- г) закалка с  $790 \pm 10$  °С, выдержка 90 мин, охлаждение в воде 90 с, далее отпуск в печи при 250–270 °С, выдержка 3 ч, далее на воздухе.

В результате исследований макроструктуры исходной заготовки из стали 65Г после травления реактивом Обергоффера было выявлено, что она характеризуется наличием зон: корковой глубиной 0–0,6 мм, столбчатых кристаллов 15–17 мм и в остальных сечениях – кристаллы равноосные, разориентированные (ячеистые), рис. 2.

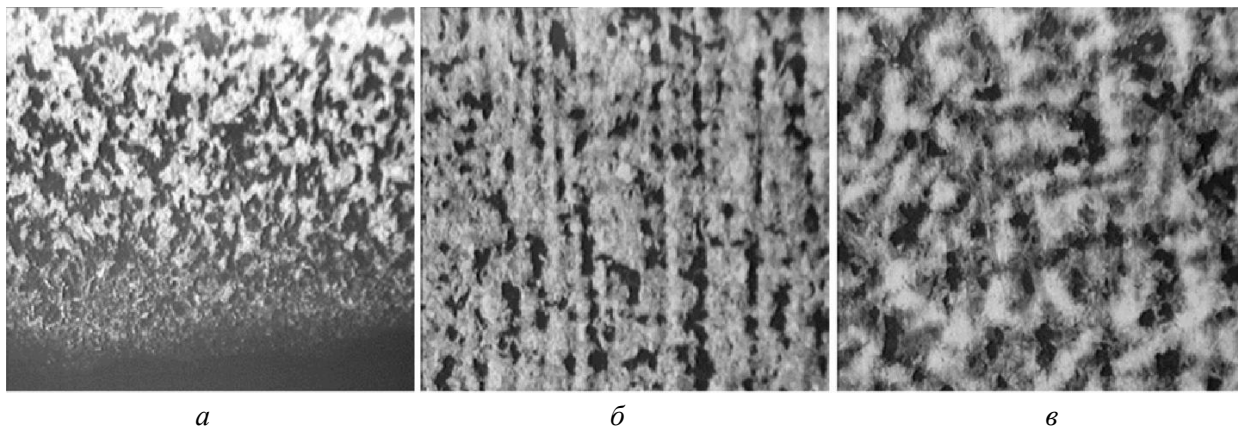


Рис. 2 Макроструктура стали 65Г по сечению: а – поверхность; б –  $\frac{1}{2} R$ ; в – центр,  $\times 50$

В осевой зоне, преимущественно наличие перлитной составляющей в исходной структуре, в дендритной наблюдается светлое ликвационное пятно со шлаковыми включениями и трещинами, являющееся результатом подсадочной ликвации. Такая неоднородность структуры в осевой зоне заготовки при последующих нагревах может способствовать возникновению трещин и разрушению готовых изделий в условиях ударно-абразивного воздействия.

Микроструктура стали 65Г состоит из перлита и обломков ферритной сетки, образовавшейся по границам бывшего аустенитного зерна 5–6 номера по шкале ГОСТ 5639–82. Перлит плотного сорбитообразного строения, встречаются участки пластинчатого перлита. Поверхность металла обезуглерожена: полностью на глубину 0,25–0,30 мм, частично до 0,8 мм, и поражена единичными раскатанными газовыми пузырями максимальной глубины 0,50 мм. Это свидетельствует об отсутствии предварительной термической обработки и низком качестве заготовки.

Для определения параметров охлаждения при закалке шаров диаметром 60 мм был выполнен теплотехнический расчет изменений температуры по сечению в зависимости от времени закалки в воде. Основанием для расчета этих параметров послужила разработка технологии самоотпуска, процесса, при котором нагрев шара будет проводиться за счет тепла, которое сохранилось после закалки в середине шара. Такой технологический процесс способствует уменьшению внутренних термических напряжений.

Необходимо определить, сколько нужно находиться в воде шару, чтобы в середине осталось достаточно тепла на разогрев до температур близких температуре отпуска 250–260 °С. Расчет проводился от центра образца к поверхности шара с шагом 3 мм. Поверхностный слой  $\frac{1}{2} R = 15$  мм для шаров диаметром 60 мм и 10 мм для шаров диаметром 40 мм по требованиям ГОСТ должен закалиться и отвечать требованиям твердости для шаров 3–4 класса прочности. Из этого следует, что закаливать надо как минимум столько времени, чтобы на глубине 5 мм и 10 мм соответственно, температура была ниже температуры мартенситного превращения – 270 °С. Изменение температуры по сечению образца  $\varnothing 60$  мм из стали 65Г при охлаждении в воде в течение 60 с и последующем охлаждении на воздухе, приведено на рис. 3.

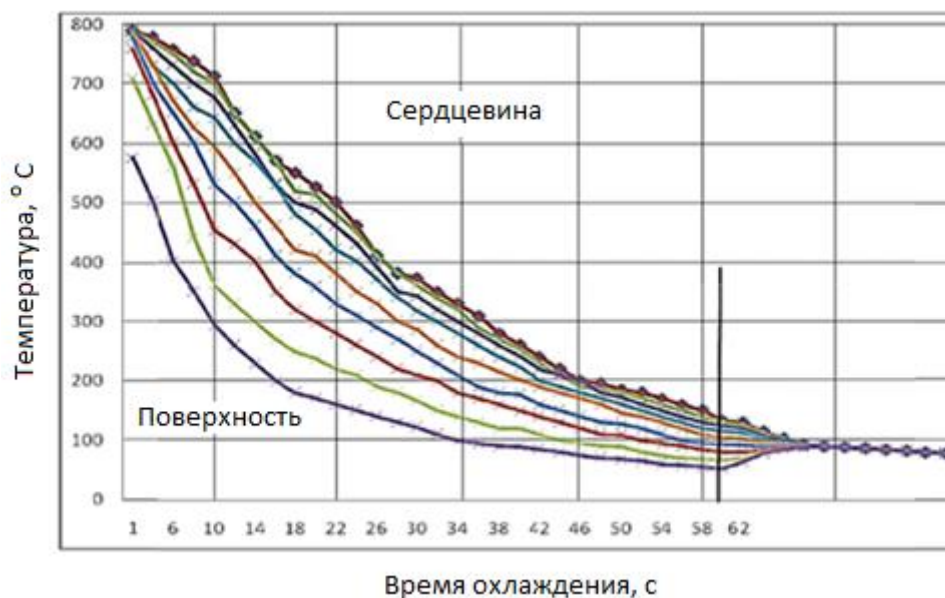


Рис. 3 Изменение температуры по сечению образца  $\varnothing 60$  мм из стали 65Г при охлаждении в воде в течение 60 с и дальнейшем охлаждении на воздухе

В ходе исследования необходимого времени для закалки мелющих шаров был сделан вывод, что для закалки поверхностного слоя время охлаждения должно составлять не менее 60 с, но температуры, которая сохранилась в шаре после закалки, будет недостаточно для процесса самоотпуска, поэтому планируется отпускной бункер с подогревом.

После выполнения экспериментальных режимов, приведенных выше, изучали распределение твердости и микроструктуры по сечению. Данные о распределении твердости по сечению образцов из стали 65Г после различного времени охлаждения в воде представлены на рис. 4.

По результатам измерения твердости назначили температуру отпуска для получения в поверхностном слое твердости не ниже 55 HRC согласно ДСТУ для 4 группы мелющих шаров. Результаты измерения твердости после закалки и отпуска при температуре 240–260 °С и изучения микроструктуры по сечению представлены на рис. 5 и 6 соответственно.

Из анализа графика измерения твердости видно, что глубина закаленного слоя образца стали 65Г после закалки составляет 8–10 мм, что не удовлетворяет требованиям ДСТУ мелющих шаров 4 группы по твердости, а после отпуска при 240–260 °С глубина прокаливаемости составляет 7–8 мм, а не  $\frac{1}{2} R$  ( $\approx 15$  мм). На глубине  $\frac{1}{2} R$  твердость составила 39–40 HRC, что может удовлетворить требования 3 группы прочности. На основании этого было увеличено время охлаждения до 90 с.

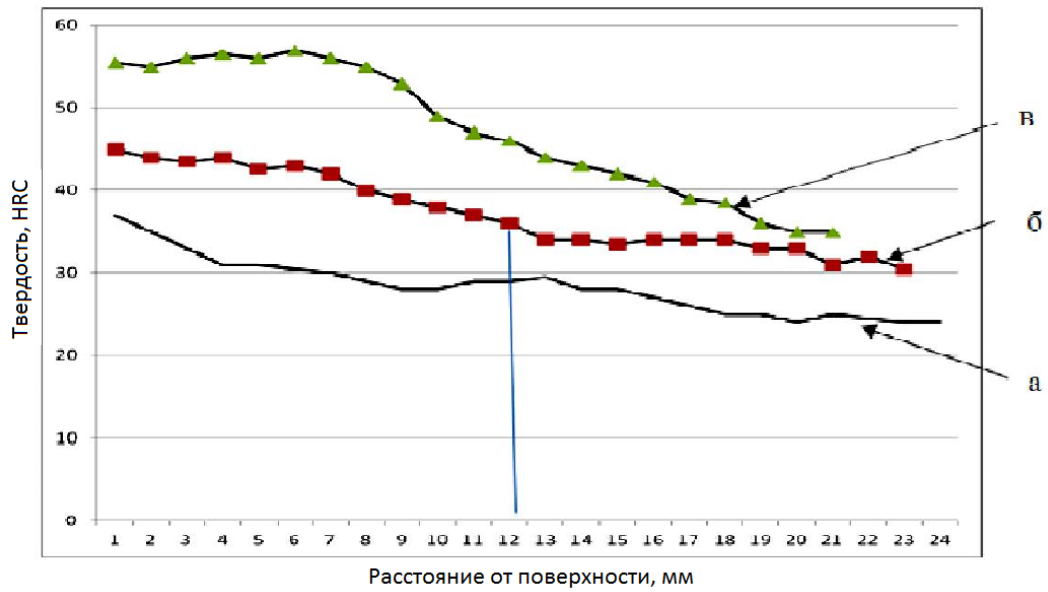


Рис. 4 Твердость по сечению образцов  $\varnothing 60$  мм из стали 65Г после закалки в воде в течение: *a* – 20 с; *б* – 30 с; *в* – 60 с

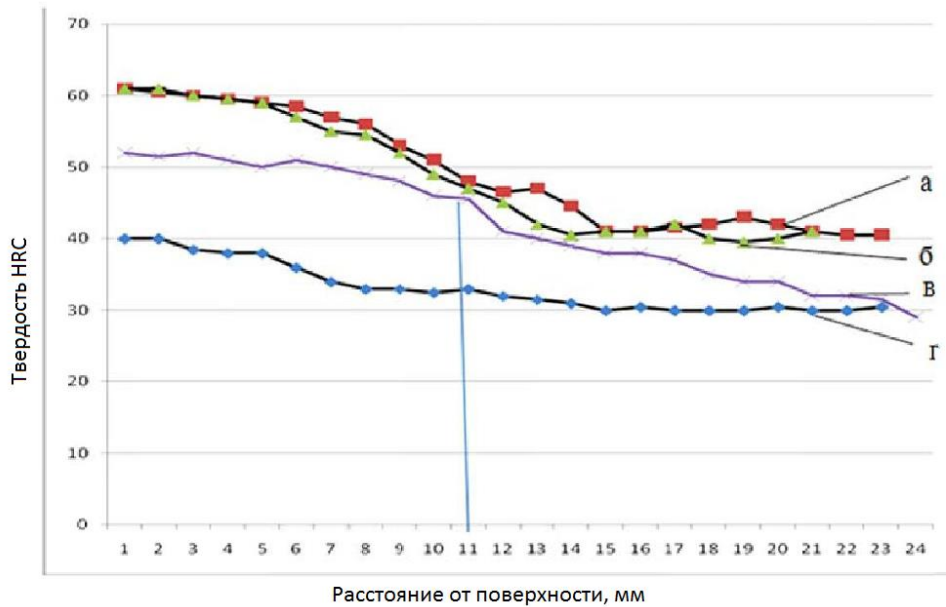


Рис. 5 Распределение твердости по сечению образцов  $\varnothing 60$  мм из стали 65Г в 2-х противоположных направлениях (*a*, *б*) после полной закалки в воде и отпуска при температуре 240–260 °С (*в*), и 290–310 °С (*г*)

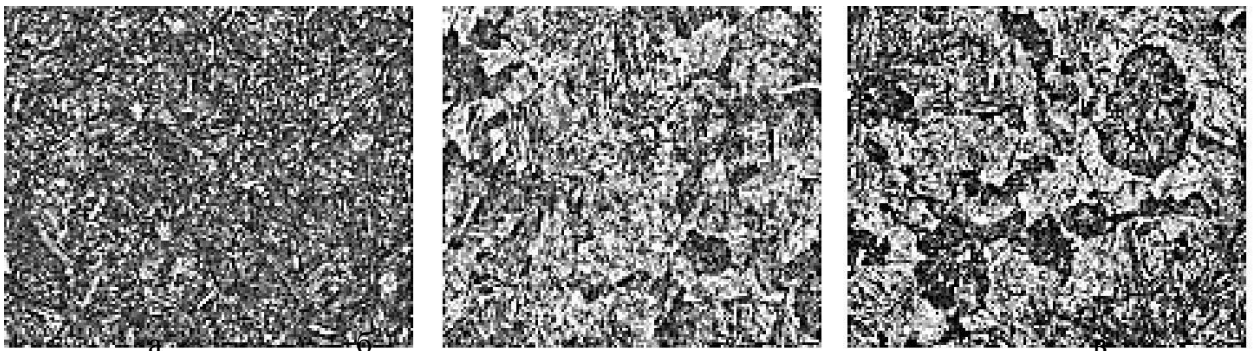


Рис. 6 Микроструктура образцов из стали 65Г после закалки в воде в течение 90 с: *a* – на поверхности; *б* – на расстоянии  $\frac{1}{2} R$ ; *в* – в центре,  $\times 500$

При увеличении времени охлаждения заготовки в воде до 90 с прокаливаемость увеличилась до 10–12 мм, что подтверждается и микроструктурными исследованиями.

Таким образом, из анализа проведенных экспериментальных режимов термической обработки заготовок Ø60 мм из стали 65Г, можно сделать вывод, что продолжительность охлаждения в воде при закалке должна составлять не менее 90 с перед самоотпуском, хотя по теплотехническим расчетам она составляет 60 с, температура отпуска для достижения необходимой твердости поверхности (не менее 55 HRC) должна быть 240–260 °С в течение не менее трех часов. Глубина прокаливаемости заготовок исследуемой стали (10–12 мм) удовлетворяет требованиям к шарам только 40 мм для 4 группы и 60 мм для 3 группы.

На ПАО «ДМПЗ» был осуществлен экспериментальный запуск шаропрокатного стана для отработки его работы и получено несколько шаров диаметром 60 мм из стали 65Г для исследований. Из полученных результатов по твердости и микроструктуре установлено, что деформация при прокатке шаров повышает твердость на 2–3 HRC и увеличивает глубину прокаливаемости на 1–2 мм, при этом измельчается структура за счет обжата при прокатке, исчезает осевая зона ликвации, но в целом эти показатели все равно не удовлетворяют требования ДСТУ для шаров диаметром 60 мм.

### **Выводы**

Показано, что теоретические расчеты не всегда верны и требуют корректировки, т. е. проведения дополнительных экспериментальных исследований. Установлено, что, регулируя длительность охлаждения, можно управлять конечной структурой и свойствами стали. Длительность охлаждения в воде при закалке должна составлять не менее 90 с перед самоотпуском, хотя по теплотехническому расчету она составляет 60 с, температура отпуска для достижения необходимой твердости поверхности (не менее 55 HRC) должна быть 240–260 °С в течение не менее трех часов. Глубина прокаливаемости заготовок исследуемой стали 65Г (10–12 мм) удовлетворяет требованиям к шарам только 40 мм для 4 группы и 60 мм для 3 группы.

### **Библиографический список**

1. Экономические предпосылки использования мелющих тел повышенного качества и технологические аспекты их производства / В. Г. Ефременко [и др.] // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 25. – С. 1–4.
2. Опыт освоения комбинатом «Азовсталь» технологии производства катаных мелющих шаров диаметром 120 мм с твердостью по 3-й группе ДСТУ 3499 / В. Г. Ефременко [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2006. – № 3. – С. 25–28.
3. Современная технология производства стальных мелющих шаров с улучшенными эксплуатационными характеристиками / В. Г. Ефременко [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2005. – № 1. – С. 11–13.
4. Освоение производства штампованных мелющих шаров диаметром 100 мм повышенной твердости / В. Н. Агафонов [и др.] // Металл и литье Украины. – 2005. – № 1–2. – С. 43–44.
5. Влияние термической обработки на свойства катаных мелющих шаров высокой прокаливаемости / Ф. К. Ткаченко [и др.] // МиТОМ. – 2001. – № 8. – С. 26–28.
6. Основные принципы выбора материалов для изготовления мелющих тел, работающих в условиях ударно-абразивного, ударно-коррозионно-абразивного и ударно-усталостного износа / В. А. Игнатов [и др.] // Металл и литье Украины. – 2001. – № 10–11. – С. 31–34.
7. Разработка и освоение новой технологии закалки мелющих шаров с прокатного нагрева / А. Н. Клименко [и др.] // Сталь. – 1986. – № 11. – С. 71–72.

## ВЫСОКОТВЕРДАЯ ВОЛЬФРАМО-МОЛИБДЕНО-КОБАЛЬТОВАЯ БЫСТРОРЕЖУЩАЯ СТАЛЬ ПОВЫШЕННОЙ ВЯЗКОСТИ

Антипов Валерий Иванович,  
Виноградов Леонид Викторович,  
Колмаков Алексей Георгиевич,  
Мухина Юлия Эдуардовна,  
Баннх Игорь Олегович,  
Баранов Евгений Евгеньевич,  
Пруцков Михаил Евгеньевич,  
E-Mail: mprm03@gmail.com,

Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН,  
г. Москва

**Аннотация.** Среди большого числа современных инструментальных материалов, применяемых в машиностроении, наибольшим спросом пользуются быстрорежущие стали, которые по сравнению с металлокерамическими твердыми сплавами, керамикой и сверхтвердыми материалами (алмазом, эльбором) обладают повышенной вязкостью. Это позволяет изготавливать из быстрорежущих сталей инструмент с тонкой режущей кромкой – протяжки, метчики и др., а также инструмент, работающий с ударными нагрузками, – строгальные и долбежные резцы. Однако существенным недостатком быстрорежущих сталей является их относительно низкая твердость. Поэтому разработка быстрорежущей стали с твердостью в изделиях до 70–71 HRC является весьма актуальной задачей современного материаловедения. В докладе представлены основные технические решения, обеспечившие успешное создание новой вольфрамо-молибдено-кобальтовой быстрорежущей стали с твердостью в изделиях 70–72 HRC при сохранении удовлетворительной вязкости материала.

**Ключевые слова.** Инструмент, сталь, закалка, отпуск, твердость, износостойкость, вязкость.

### Введение

В настоящее время в различных отраслях обрабатывающей промышленности наибольшим спросом пользуются быстрорежущие стали, которые по сравнению с металлокерамическими твердыми сплавами, керамикой и сверхтвердыми материалами обладают повышенной вязкостью и прочностью на изгиб, превосходящей в 3–10 раз аналогичный показатель у других групп инструментальных материалов. Это позволяет изготавливать из быстрорежущих сталей инструменты с тонкой режущей кромкой, а также инструменты, работающие в условиях ударных нагрузок. Однако основным недостатком быстрорежущих сталей является их относительно низкая твердость. Поэтому была предпринята попытка создания высокотвердой вольфрамо-молибдено-кобальтовой быстрорежущей стали с твердостью до 70–71 HRC, при сохранении удовлетворительного уровня вязкости металла в инструменте.

### Полученные результаты и обсуждение

При выборе оптимального химического состава материала и определении режимов термической обработки, в качестве базового аналога использовали сталь марки ЭП-682-Ш. Однако существенным недостатком этой стали является большой разброс значений твердости от 64 до 68,5 HRC. Проведенный анализ показал, что на твердость материала существенное влияние оказывает соотношение углерода и ванадия (с/v) в составе стали. Дело в том, что твердость карбида ванадия  $V_4C_3$  оказывается значительно выше твердости карбидов, образованных вольфрамом и хромом [1–3]. Поэтому присутствие ванадия в количестве 3,0–3,5 % в вольфрамо-молибдено-кобальтовых быстрорежущих сталях обеспечивает высокую износостойкость режущего инструмента [1, 2]. При этом, следует

учитывать, что карбиды ванадия крайне устойчивы против растворения при нагреве инструмента под закалку и при высоком содержании ванадия в составе сплава происходит обеднение твердого раствора аустенита углеродом, что приводит к снижению твердости мартенсита закаленной стали. Было установлено, что для достижения значений твердости инструмента из вольфрамо-молибдено-кобальтовых быстрорежущих сталей порядка 68–69 HRC соотношение углерода и ванадия (с/v) должно быть более 0,45. После высокотемпературной закалки фазовый состав быстрорежущих сталей включает: 15–20 % первичных карбидов ледебуритной эвтектики, 55–60 % мартенсита закалки (первичного мартенсита) и 25–30 % остаточного аустенита. Повышенное содержание остаточного аустенита существенно снижает твердость закаленной стали, поэтому, окончательно высокая твердость быстрорежущих сталей формируется только после процедуры многократного отпуска. Рекомендуемая температура отпуска инструмента из различных групп быстрорежущих сталей составляет  $560 \pm 10$  °С при продолжительности каждого отпуска 1 ч [1, 3, 4]. Кратность отпуска обычно равна трем. При отпуске закаленных быстрорежущих сталей протекают следующие процессы: отпуск первичного мартенсита закалки; превращение остаточного аустенита в мартенсит отпуска (вторичный мартенсит); выделение дисперсных карбидов (вторичных карбидов) из мартенсита [1, 4]. Многократный отпуск сопровождается снижением твердости первичного мартенсита закалки, но, при этом, превращение остаточного аустенита во вторичный мартенсит и образование вторичных карбидов высокой степени дисперсности способствует росту общей твердости быстрорежущих сталей. Последние два процесса, в свою очередь, зависят от температуры и продолжительности (кратности) отпуска. В ходе исследований, выполненных на образцах из стали ЭП-682-Ш, был опробован ряд режимов отпуска при температурах от 500 до 580 °С с кратностью отпуска от одного до восьми. Наибольший прирост твердости по сравнению со стандартным режимом (560 °С – 1 ч, 3 раза) был получен при температуре отпуска 520 °С – 1 ч на воздухе при кратности 6. Весьма существенный прирост твердости от 1,5 до 2,5 единиц HRC по сравнению с общепринятым режимом отпуска обеспечивался следующими факторами. Заметным снижением температуры отпуска с 560 до 520 °С, что обеспечивало сохранение высокой твердости первичного мартенсита закалки. Образованием при низкой температуре отпуска частиц вторичных карбидов (карбидов отпуска) с более высокой степенью дисперсности. Более полным превращением остаточного аустенита в мартенсит вторичный (мартенсит отпуска). Однако создание новой быстрорежущей стали с твердостью в изделиях 71 HRC одновременно потребовало сохранения удовлетворительной вязкости материала. Вязкость быстрорежущих сталей определяется следующими факторами: вязкостью мартенситной матрицы; степенью чистоты металла по неметаллическим включениям; величиной зерна аустенита, получаемого при нагреве инструмента под закалку; величиной карбидной неоднородности быстрорежущих сталей.

В ходе исследований, проведенных на образцах лабораторных плавок различных групп быстрорежущих сталей, было изучено влияние легирующих элементов на вязкость мартенсита закалки. Установлено, что единственным элементом, повышающим вязкость мартенситной матрицы, является никель. Для повышения вязкости разрабатываемой быстрорежущей стали повышенной твердости, было рекомендовано вводить в ее состав от 0,40 до 0,60 % никеля. Но, поскольку, никель повышает устойчивость остаточного аустенита, то одновременно с его введением в составе стали был снижен верхний предел содержания, стабилизирующего аустенит, марганца до 0,30 %. Существенно снижают вязкость сталей неметаллические включения (оксиды, сульфиды, нитриды). Поэтому при разработке новой вольфрамо-молибдено-кобальтовой быстрорежущей было предусмотрено ее легирование алюминием в количестве 0,10–0,20 % и кальцием от 0,15 % до 0,25 %. Эксперимент, проведенный на металле лабораторных плавок, показал снижение оксидов с 0,0178 до 0,0109 % и сульфидов с 0,0153 до 0,0087 %. С целью определения оптимальной температуры закалки, обеспечивающей получение мелкого

зерна были определены температура начала интенсивного роста зерна, которая составила 1245 °С, а также температура начала оплавления границ зерен – 1285 °С. Для получения достаточно мелкого зерна, обеспечивающего повышенную вязкость инструмента, была рекомендована температура нагрева под закалку  $1230 \pm 10$  °С. Существенное влияние на вязкость металла быстрорежущих сталей оказывает карбидная неоднородность [2], которая определяется степенью дисперсности частиц первичных карбидов ледебуритной эвтектики и характером их распределения в объеме горячедеформированных (кованных и прокатанных) заготовок. Чем мельче частицы первичных карбидов и равномернее они распределены в объеме металла, тем меньше балл карбидной неоднородности. Карбидная неоднородность быстрорежущих сталей во многом зависит от «величины укова», который представляет собой отношение площадей поперечного сечения исходного слитка к площади сечения конечной сортовой заготовки. Наилучшим способом уменьшения карбидной неоднородности в быстрорежущих сталях является радиально-сдвиговая прокатка, при которой в результате сдвига и смещения слоев металла в очаге деформации происходит интенсивное дробление частиц первичных карбидов ледебуритной эвтектики и их равномерное распределение в объеме металла [5]. Наибольшее развитие процесс получает в поверхностном слое горячекатанных заготовок. Кроме того, благодаря интенсивной деформации в рабочей зоне прокатного стана, в очаге деформации происходит значительный перегрев (до 80–100 °С) металла. Это сопровождается растворением острых кромок дисперсных частиц первичных карбидов, которые приобретают округлую форму, способствуя, тем самым, увеличению вязкости металла инструмента. Таким образом, структура быстрорежущей стали, приобретает строение естественного дисперсно-упрочненного композиционного материала, состоящего из мартенситной матрицы с равномерно распределенными в ней дисперсными частицами первичных карбидов ледебуритной эвтектики. Такой материал обладает одновременно высокой твердостью и вязкостью, что позволяет изготавливать из него инструмент ударного действия. Из прутка новой быстрорежущей стали диаметром 10 мм, полученного посредством радиально-сдвиговой прокатки, были изготовлены керны для разметки рабочей части образцов высокопрочных сталей и жаропрочных сплавов, имеющих твердость 39–41 HRC. Испытания кернов показали стойкость до затупления в 25–30 раз выше по сравнению с применяемыми ранее кернами из мартенсито-старееющей стали ЭП-637-ВД. На основании результатов, полученных в ходе проведенных исследований, был предложен следующий состав новой высокотвердой вольфрамо-молибдено-кобальтовой быстрорежущей стали: 1,25–1,35 % углерода; 2,0–2,5 % ванадия; 11,5–12,5 % вольфрама; 2,5–3,5 % молибдена; 9,5–10,5 % кобальта; 0,40–0,60 % никеля; не более 0,30 % марганца; не более 0,40 % кремния; 0,10–0,20 % алюминия; 0,15–0,25 % кальция, остальное железо.

#### **Заключение**

В ходе проведенных исследований разработана новая вольфрамо-молибдено-кобальтовая быстрорежущая сталь повышенной вязкости с твердостью в изделиях 71 HRC. Достижение сверхвысокой твердости достигается обеспечением соотношения углерода и ванадия (с/v) в составе стали не менее 0,45, а также применением нового шестикратного отпуска 520 °С – 1 ч, воздух. Удовлетворительная вязкость металла инструмента из новой быстрорежущей стали достигается за счет формирования мелкозернистой структуры при закалке с температуры  $1230 \pm 5$  °С. Уменьшение загрязненности металла неметаллическими включениями было достигнуто посредством легирования сплава алюминием в количестве 0,10–0,20 % и кальцием 0,15–0,25 %, а также введением никеля в количестве 0,40–0,60 % при одновременном снижении верхнего предела по марганцу до 0,30 %. Уменьшения карбидной неоднородности осуществлялось посредством применения радиально-сдвиговой прокатки.



## Библиографический список

1. Геллер Ю. А. Инструментальные стали / Ю. А. Геллер. – Москва : Металлургиздат, 1961. – 512 с.
2. Хайсенберг Э. 1976 Свойства сверхбыстрорежущих сталей и их практическая оценка / Э. Хайсенберг // Доклады конференции «Дни науки и техники Австрии в СССР» 5–10 апреля. – Москва, 1976. – С. 27.
3. Гуляев А. П. Инструментальные стали / А. П. Гуляев, К. А. Малинина, С. М. Саверена. – Москва : Машиностроение, 1975. – 272 с.
4. Hoybe G. Speed Steel Alloys *Alloys Metals Review* 1965, Vol.12, № 115, pp. 25-31.
5. Галкин С. П. Использование радиально-сдвиговой прокатки для получения в сталях ледебуритного класса структуры естественных дисперсно-упрочненных композиционных материалов / С. П. Галкин, И. В. Доронин, А. Е. Антощенко [и др.] // Технология металлов. – 2007. – № 4. – С. 6.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЦЕРИЯ ИЗ ШЛАКОВ СИСТЕМЫ $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15\%Al}_2\text{O}_3\text{-8\%MgO}$

Бабенко Анатолий Алексеевич,  
Смирнов Леонид Андреевич,  
Уполовникова Алена Геннадьевна,  
E-Mail: [upol.ru@mail.ru](mailto:upol.ru@mail.ru),  
Шартдинов Руслан Рафикович,  
Институт металлургии УрО РАН,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** С помощью теоретических и экспериментальных исследований показана возможность восстановления церия из шлаков системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$ , содержащих 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 8 %  $\text{MgO}$ , алюминием, растворенным в металле, при температурах 1550 и 1650 °С. Теоретические исследования выполнены с использованием программного комплекса *HSC 8.03 Chemistry (Outokumpu)*, основанном на минимизации энергии Гиббса и вариационных принципах термодинамики с применением метода симплексных решеток планирования. Результаты математического моделирования представлены графически в виде диаграмм состав – равновесное содержание церия в металле. Установлено, что в зависимости от температуры металла, основности шлака и содержания оксида церия в сталь, содержащую 0,06 % углерода, 0,25 % кремния и 0,05 % алюминия, переходит от 0,055 до 16 ppm церия. Положительное влияние температурного фактора, основности шлаков и содержания оксида церия в изучаемом диапазоне химического состава на процесс восстановления церия объясняется с позиции фазового состава формируемых шлаков и термодинамики реакций восстановления церия. Экспериментально подтверждена возможность восстановления церия из шлаков системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$ , содержащих 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 8 %  $\text{MgO}$ . Показано, что при основности 5 и 4 %  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  в шлаке при выдержке 10 мин в металл переходит до 16 ppm церия.

**Ключевые слова.** Сталь, церий, шлак, основность, оксид церия, фазовый состав, планирование эксперимента, термодинамическое моделирование, диаграммы состав-свойство.

### Введение

В связи с увеличением в России строительства протяженных магистральных газопроводов все более актуальными для отечественной металлургии становятся исследования и разработка состава высокопрочных трубных сталей и инновационных технологических решений их производства. Перспективным направлением решения

проблемы является микролегирование стали бором [1–6]. Микролегирование низкоуглеродистой стали бором применяется для увеличения комплекса механических, технологических и эксплуатационных свойств при экономно легированном химическом составе. Однако условия, в которых прокладывают и эксплуатируются трубопроводы, характеризуются, как правило, холодным климатом и высокой сейсмической активностью, поэтому наряду с высокой прочностью к трубным сталям предъявляют высокие требования к ударной вязкости при низких температурах и деформационной способности. Однако пластичность низкоуглеродистых сталей связана с пределом прочности, увеличение которой сопровождается снижением, как относительного удлинения, так и сужения. Одним из направлений решения проблемы сохранения высокой прочности и обеспечения пластичности низкоуглеродистой стали является организация процесса модифицирования металла РЗМ. Положительное влияние РЗМ на пластичность, ударную вязкость и стойкость к циклическому растрескиванию трубной стали неоднократно подтверждалась исследованиями [7–11].

Как известно, для модифицирования стали РЗМ используют ферросплавы, что приводит к увеличению себестоимости стали. Одним из направлений решения проблемы может быть восстановление РЗМ из оксидных систем. Известно, что введение в рафинирующий шлак  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  способствует снижению активности вредных включений  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в металле, температуры плавления и вязкости шлака, а также увеличению степени десульфурации [12–18]. Кроме того, отмечают возможность восстановления церия из шлаков изучаемой оксидной системы и растворение его в стали в количестве до 4 ppm, обеспечивая тем самым эффект модифицирования стали, причем микроструктура выплавленного металла лучше измельчается и состоит из феррита и небольшого количества перлита [13–16].

Нами представлены теоретические и экспериментальные исследования возможности восстановления церия из шлаков системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15\%Al}_2\text{O}_3\text{-8\%MgO}$  алюминием, растворенным в металле, при температурах 1550 и 1650 °С.

#### **Экспериментальная часть**

Термодинамическое моделирование восстановления церия из шлаков системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$ , содержащих 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 8 %  $\text{MgO}$ , алюминием, растворенным в металле, при температурах 1550 и 1650 °С выполнено с использованием программного комплекса *HSC 8.03 Chemistry (Outokumpu)*, основанном на минимизации энергии Гиббса и вариационных принципах термодинамики с применением метода симплексных решеток планирования [19–22]. Сущность метода симплексных решеток планирования заключается в построении матрицы планирования, где изменяются основность шлака и содержание  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  в шлаке (табл. 1) с последующим построением на основании термодинамических расчетов математической модели, описывающей зависимость равновесного содержания церия в металле от состава шлака, представленную в виде диаграмм химический состав шлаков системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3$ , содержащих 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 8 %  $\text{MgO}$  – равновесное содержание церия в металле при температурах 1550 и 1650 °С (рис. 1, 2). На диаграммах синими линиями обозначены изолинии равновесного содержания церия. Тонкими черными линиями нанесены основность шлака ( $B = \text{CaO/SiO}_2$ ), цифрами – их значения.

Экспериментальные исследования по восстановлению церия из шлака проводили на высокотемпературной установке, выполненной на базе печи сопротивления Таммана. В качестве экспериментального шлака использовали шлак системы  $58\%\text{CaO-12\%SiO}_2\text{-4\%Ce}_2\text{O}_3\text{-15\%Al}_2\text{O}_3\text{-8\%MgO}$ . В качестве металла использовали сталь, содержащую 0,06 % углерода, 0,25 % кремния и 0,05 % алюминия. Образец металла массой 90 г и шлак в количестве 9 г (10 % от массы металла) загружали в корундовый тигель и устанавливали в печь, нагревали и расплавляли. Расплавленные металл и шлак нагревали до температуры 1650 °С и выдерживали в тигле в течение 10 мин. Было проведено 4 параллельных опыта с выдержкой металла под шлаком указанного выше состава в тигле в течение 10 мин.

Таблица 1  
Состав шлака и результаты термодинамического моделирования  
равновесного содержания церия в металле

№	Индекс шлака	Состав шлака, масс.%					[Ce], ppm		B = CaO/SiO <sub>2</sub>
		CaO	SiO <sub>2</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	1550 °C	1650 °C	
1	Y <sub>1</sub>	50,7	25,3	1	15	8	0,055	0,085	2
2	Y <sub>2</sub>	63,3	12,7	1	15	8	1,89	2,68	5
3	Y <sub>3</sub>	58,3	11,7	7	15	8	11,7	16,1	5
4	Y <sub>4</sub>	46,7	23,3	7	15	8	0,42	0,64	2
5	Y <sub>13</sub>	59,1	16,9	1	15	8	0,72	1,03	3,5
6	Y <sub>132</sub>	56	16	5	15	8	3,47	4,94	3,5
7	Y <sub>22</sub>	60	12	5	15	8	8,77	12,2	5
8	Y <sub>12</sub>	54,9	21,1	1	15	8	0,23	0,34	2,6
9	Y <sub>121</sub>	53,2	20,8	3	15	8	0,65	0,95	2,6
10	Y <sub>21</sub>	61,6	12,4	3	15	8	5,43	7,61	5
11	Y <sub>131</sub>	57,5	16,5	3	15	8	2,09	3,00	3,5
12	Y <sub>41</sub>	48	24	5	15	8	0,29	0,44	2
13	Y <sub>31</sub>	54,5	15,5	7	15	8	4,85	6,87	3,5
14	Y <sub>42</sub>	49,4	24,6	3	15	8	0,17	0,26	2
15	Y <sub>32</sub>	50,5	19,5	7	15	8	1,62	2,36	2,6
16	Y <sub>122</sub>	51,9	20,1	5	15	8	1,13	1,66	2,6

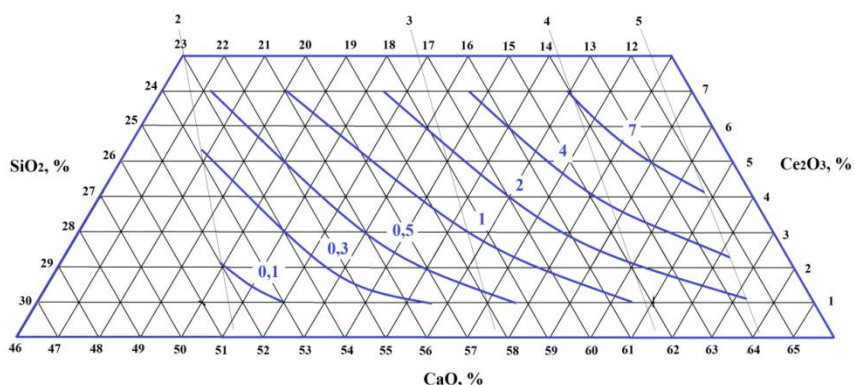


Рис. 1 Диаграмма равновесного содержания церия в металле, выдержанном под шлаком системы CaO-SiO<sub>2</sub>-Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, содержащей 15 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 8 % MgO при температуре 1550 °C

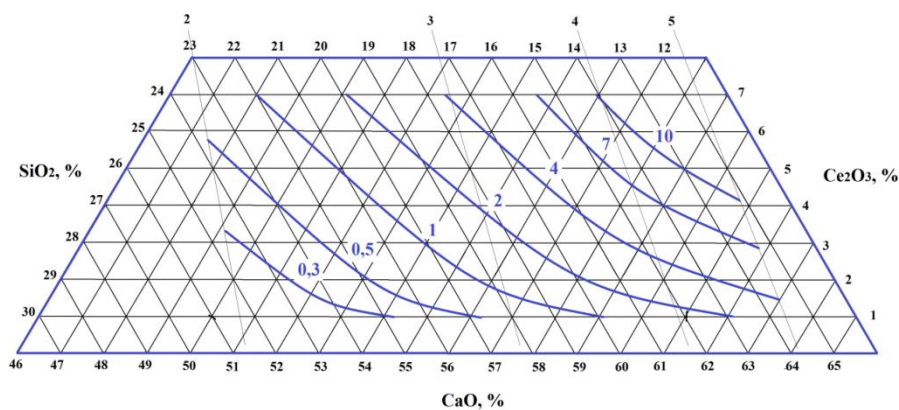


Рис. 2 Диаграмма равновесного содержания церия в металле, выдержанном под шлаком системы CaO-SiO<sub>2</sub>-Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, содержащей 15 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 8 % MgO при температуре 1650 °C

## Результаты и их обсуждение

В зависимости от температуры металла, основности шлака и содержания оксида церия за счет химических реакций, приведенных в табл. 2, в металл переходит от 0,055 до 16 ppm церия. При этом выдержка металла, содержащего 0,06 % С, 0,25 % Si и 0,05 % Al, под шлаком основностью 2,0, содержащим 1,0 % оксида церия, в металл при температуре 1550 °С переходит до 0,055 ppm церия. Повышение температуры системы до 1650 °С сопровождается незначительным увеличением концентрации церия, достигающей не более 0,085 ppm. При увеличении до 7,0 % концентрации оксида церия в шлаке основностью 2,0 наблюдается более существенный прирост содержания церия в металле, достигающий в диапазоне температур 1550–1650 °С, соответственно 0,4–0,6 ppm.

Рост основности шлака благоприятно сказывается на развитии процесса восстановления церия. Повышение основности шлака с 2 до 5 приводит при температуре 1550 °С к повышению равновесного содержания церия в металле с 0,1 до 7 ppm (рис. 1). При этом с ростом температуры до 1650 °С равновесное содержание церия в металле увеличивается и изменяется в рассматриваемом диапазоне основности шлака среднем с 0,3 до 10 ppm (рис. 2).

Таблица 2

Изменение энергии Гиббса химических реакций восстановления церия

№	Химические реакции	$\Delta G, \text{кДж/моль}$	
		1550 °С	1650 °С
1	$2\text{Ce}_2\text{O}_3 + 6\text{Al} = \text{CeAlO}_3 + 2\text{CeAl}_2$	-173	-164
2	$\text{CeAlO}_3 + 2\text{Al} + 3\text{CaO} = \text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 + 2\text{CeAl}_2$	-83	-84
3	$\text{CeAl}_2 + 1.5\text{SiO}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ce} + 1.5\text{Si}$	-93	-91
4	$3\text{CeO}_2 + 4\text{Al} + 6\text{CaO} = 3\text{Ce} + 2\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	-226	-233

Согласно приведенным в табл. 2 данным, алюминий, растворенный в металле, взаимодействует с оксидами церия  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$  и алюминатом церия  $\text{CeAl}_2\text{O}_3$  по реакциям 1, 2 и 4 с образованием алюминидов церия  $\text{CeAl}_2$ , трехкальциевого алюмината и металлического церия. Алюминид церия  $\text{CeAl}_2$ , взаимодействуя с оксидом кремния  $\text{SiO}_2$  по реакции 3, обеспечивает образование оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шлаке, церия и кремния в металле. Однако, низкие концентрации свободных оксидов церия  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ , не превышающие 0,009 и 0,005 %, и свободного оксида кальция  $\text{CaO}$ , не превышающего 2,5 %, в шлаках, формируемых в области пониженной до 2,0 основности и содержащих не более 1,0 % оксида церия, не обеспечивают должного развития приведенных в табл. 2 реакций и, как следствие, не высоких концентраций церия в металле (табл. 1). Наблюдаемое незначительное повышение концентрации церия в металле с повышением температуры металла и концентрации свободных оксидов церия  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ , достигающих 0,05 и 0,007 %, обусловлено, по-видимому, развитием реакций 2 и 4. Повышение основности формируемых шлаков до 5,0 сопровождается увеличением концентрации свободного оксида кальция  $\text{CaO}$  до 24 % и, как следствие, повышением равновесной концентрации церия в металле (табл. 1) за счет развития реакций 2 и 4.

Выдержка металла, содержащего 0,06 % углерода, 0,25 % кремния и 0,05 % алюминия под шлаком, содержащим 58 %  $\text{CaO}$ , 12 %  $\text{SiO}_2$ , 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 8 %  $\text{MgO}$  и 4 %  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ , сопровождается восстановлением церия, концентрация которого уже через 10 мин. выдержки приближается к 16 ppm церия. При этом экспериментальные данные практически подтверждают результаты термодинамического моделирования.

## Заключение

Установлено, что в зависимости от температуры металла, основности шлака и содержания оксида церия в сталь, содержащую 0,06 % углерода, 0,25 % кремния и 0,05 % алюминия, переходит от 0,055 до 16 ppm церия. Термодинамическое моделирование в совокупности с методом симплексных решеток планирования позволили с минимальными временными и материальными затратами получить новые данные о равновесном содержании церия в металле, содержащем 0,06 % С, 0,25 % Si, 0,05 % Al,

выдержанном под шлаком системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15\%Al}_2\text{O}_3\text{-8\%MgO}$  в широком диапазоне химического состава при температурах 1550 и 1650 °С. При этом результаты термодинамического моделирования подтверждены экспериментально.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00825.*

#### Библиографический список

1. Ghali S. N., El-Faramawy H. S., Eissa M. M. Influence of Boron Additions on Mechanical Properties of Carbon Steel. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2012. № 11. Pp. 995–999.
2. Murari F. D., Vasconcelos da Costa e Silva A.L., de Avillez R.R. Cold-rolled multiphase boron steels: microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2015. 4(2). Pp. 191–196.
3. Łętkowska B., Dziurka R., Bała P. The analysis of phase transformation of undercooled austenite and selected mechanical properties of low-alloy steel with boron addition. *Archives of civil and mechanical engineering*. 2015. № 15. Pp. 308–316.
4. Лякишев Н. П. Борсодержащие стали и сплавы / Н. П. Лякишев, Ю. Л. Плинер, С. И. Лаппо – Москва : Металлургия, 1986. – 192 с.
5. Бабенко А. А. Теоретические основы и технология глубокой десульфурации металла и прямого микролегирования стали бором под основными борсодержащими шлаками / А. А. Бабенко, Л. А. Смирнов, А. Г. Уполовникова [и др.] // *Металлург.* – 2019. – № 12. – С. 23–28.
6. Бабенко А. А. Формирование основных борсодержащих шлаков – перспективное направление внепечной десульфурации и прямого микролегирования низкоуглеродистой стали бором / А. А. Бабенко, В. И. Жучков, Л. А. Смирнов [и др.] // *Черная металлургия.* – 2017. – № 9 (1413). – С. 50–54.
7. Petryna D. Yu., Kozak O. L., Shulyar B. R., Petryna Yu. D., Hredil M. I. Influence of alloying by rare-earth metal on the mechanical properties of 17G1S pipe steel. *Materials Science*. 2013. Vol. 48, № 5. Pp. 575–81.
8. Макаренко В. Д. Влияние церия на механические и коррозионные свойства низколегированных трубных сталей / В. Д. Макаренко, М. В. Киндрачук // *Компрессионное и энергетическое машиностроение.* – 2014. – № 3. – С. 24–29.
9. Torkamani H., Raygan Sh., Garcia-Mateo C., Rassizadehghani J., Palizdar Y., San-Martin D. Evolution of pearlite microstructure in low-carbon cast microalloyed steel due to the addition of La and Ce. *Metallurgical and materials transactions A*. 2018. Vol.49A. Pp. 4495–4508.
10. Смирнов Л. А. Модифицирование стали и сплавов редкоземельными элементами. Сообщение 1 / Л. А. Смирнов, В. А. Ровнушкин, А. С. Орыщенко, Г. Ю. Калинин, В. Г. Миллюц // *Металлург.* – 2015. – № 11. – С. 57–63.
11. Смирнов Л. А. Модифицирование стали и сплавов редкоземельными элементами. Сообщение 2 / Л. А. Смирнов, В. А. Ровнушкин, А. С. Орыщенко, Г. Ю. Калинин, В. Г. Миллюц // *Металлург.* – 2016. – № 1. – С. 41–48.
12. Xiaohong Y., Hu L., Guoguang C., Chengchuan W., Bin W. Effect of refining slag containing  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  on steel cleanliness. *Journal of rare earths*. 2011. Vol. 29. № 11. Pp. 1079–83.
13. Long H. Measurements of physical properties of Ce contained refining slags and their effects on steel cleanliness. *Master thesis of University of Science and Technology Beijing*. 2011. 32. Pp. 169.
14. Guo M.X., Suito H. Effect of dissolved cerium on austenite grain growth in an Fe-0.20 mass% C-0.02 mas% P alloy. *ISIJ International*. 1999. 39(11). Pp. 1169.

15. Wu C., Cheng G. and Long H. Effect of  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  and  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  on the Phase, Melting Temperature and Viscosity of  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-10 \text{ Mass\% SiO}_2$  Based Slags. *High Temp. Mater. Proc.* 2014. 33(1). Pp.77–84.
16. Feifei H., Bo L., Da L., Ligang L., Ting D., Xuejun R., Qingxiang Y. Effects of rare earth oxide on hardfacing metal microstructure of medium carbon steel and its refinement mechanism. *Journal of rare earths*. 2011. Vol. 29. № 6. Pp. 609–613.
17. Wang L. J., Wang Q., Li J.M., Chou K.C. Dissolution mechanism of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in refining slags containing  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ . *J. Min. Metall. Sect. B-Metall.* 2016. 52(1) B. Pp. 35 – 40.
18. Anacleto N.M., Lee H.-G., P.C. Hayes. Sulphur Partition between  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3$  Slags and Carbon- saturated Iron. *ISI International*. 1993. Vol. 33. № 5. Pp. 549–55.
19. Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков : метод. пособие / Ким В. А., Николай Э. И., Акбердин А. А., Куликов И. С. – Алма-Аты : Наука, 1989. – 116 с.
20. Ким В. А. Использование метода симплексных решеток для построения диаграмм типа состав – вязкость / В. А. Ким, А. А. Акбердин, И. С. Куликов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 9. – С. 167.
21. Бабенко А. А. Равновесное распределение бора между металлом системы Fe-C-Si-Al и борсодержащим шлаком / А. А. Бабенко, В. И. Жучков, Л. И. Леонтьев, А. Г. Уполовникова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 9. – С. 752–758.

## **ВЛИЯНИЕ ОСНОВНОСТИ И ОКСИДА ХРОМА НА ВЯЗКОСТЬ БОРСОДЕРЖАЩИХ ШЛАКОВ**

**Бабенко Анатолий Алексеевич,**

E-Mail: babenko251@gmail.com,

**Шартдинов Руслан Рафкович,**

E-Mail: r.shartdnov@gmail.com,

**Уполовникова Алена Геннадьевна,**

E-Mail: upol.ru@mail.ru,

**Сметанников Артем Николаевич,**

E-mail: artem.smetannikov.89@mail.ru,

**Михайлова Людмила Юрьевна,**

E-Mail: ferrostal@bk.ru,

Институт металлургии УрО РАН,

г. Екатеринбург

**Аннотация.** Основным разжижителем хромсодержащих шлаков процесса аргоноокислородного рафинирования является плавиковый шпат. Однако  $\text{CaF}_2$  оказывает отрицательное влияние на огнеупорную футеровку, а его воздействие на физико-химические свойства шлаков кратковременно из-за высокой летучести экологически вредных фторидов. Замена  $\text{CaF}_2$  оксидом бора позволяет не только улучшить физические свойства шлака, но и экологическую обстановку. В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния химического состава и температуры на вязкость шлаков системы  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Cr}_2\text{O}_3$ , содержащих 8 %  $\text{MgO}$ , 3 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 6 %  $\text{V}_2\text{O}_5$ . Установлено, что не содержащий оксида хрома шлак с основностью 1,0 обладает достаточно высокой жидкоподвижностью 0,2–0,6 Па·с в широком интервале температур 1200–1350 °С, обусловленной высокой концентрацией легкоплавких фаз, достигающей 22 % ( $\text{CaO}\cdot\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{V}_2\text{O}_5$  и  $\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ ), и только 11 % тугоплавких ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$ ). Шлак с 18 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  при той же основности

сохраняет низкую вязкость 0,1–1,0 Па·с, но уже при гораздо более высокой температуре 1450–1570 °С в связи с ростом содержания тугоплавких соединений до 27 % и практически неизменном количестве легкоплавких фаз (21 %). Вязкость шлака основностью 2,5 без оксида хрома составляет 0,07–1,0 Па·с в узком интервале температур 1650–1700 °С и 0,14–1,0 Па·с для более «короткого» шлака с 18 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> той же основности в еще более узком интервале 1650–1670 °С. Данные шлаки обладают наибольшим содержанием тугоплавких фаз около 50 %.

**Ключевые слова.** Вязкость, шлак, оксидная система, оксид хрома, оксид бора.

На текущий момент основным способом производства низкоуглеродистой нержавеющей стали в мире является аргонокислородное рафинирование (АКР), которое состоит из 2-х периодов: окислительного и восстановительного. Целью восстановительного этапа плавки на установки АКР является как восстановление хрома из шлака в металл, так и десульфурация стали, но, вследствие того, что во время окислительного периода значительная часть хрома окисляется и переходит в шлак в виде Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, вязкость шлака значительно повышается [1], а рафинирующая способность падает [2]. Авторы [2–4] отмечают, что шлаки с низкой вязкостью находятся в узкой области составов, поэтому была изучена возможность снижения вязкости данных шлаков с добавлением плавикового шпата [5, 6]. Однако плавиковый шпат имеет множество недостатков: агрессивное воздействие на футеровку, непостоянство воздействия на свойства шлака вследствие образования летучих фторидов, являющихся экологически вредными [7–10]. В качестве его альтернативы может выступить оксид бора. В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет низкую температуру плавления, а также образует легкоплавкие эвтектики с основными компонентами шлака, например, MgO·В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (температура плавления 988 °С), СаО·В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (температура плавления 1100 °С) и др. Данный оксид активно используется в доменном производстве, ковшевой металлургии и при непрерывной разливке стали [11–16]. Тем не менее, количество работ, изучающих влияние В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на физико-химические свойства хромсодержащих шлаков [17], крайне ограничено.

Шлаки данного процесса представляют собой сложную многокомпонентную систему, физико-химические характеристики которой определяют ход плавки, разделение металла и шлака и др. [2, 18], в конечном итоге определяя качество стали. Поэтому целью данной работы является изучение вязкости шлаков системы СаО-SiO<sub>2</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> основностью 1,0–2,5, содержащих 0–18 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8 % MgO, 3 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 6 % В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в данном выражении и далее по тексту указаны % мас.).

#### **Методика исследования**

Синтетические шлаки, составы которых представлены в табл. 1, выплавляли в печи сопротивления в молибденовых тиглях из оксидов марки ч.д.а., предварительно прокаленных в течение 2-3 ч при температуре 800 °С (В<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при температуре 100 °С). Измерение вязкости опытных образцов шлаков проводили на электровибрационном вискозиметре в молибденовых тиглях в токе очищенного аргона. Температуру шлака фиксировали с помощью вольфрам-рениевой термопары.

Термодинамическое моделирование фазового состава опытных образцов проведено с использованием программного комплекса *HSC Chemistry 8.03*, позволяющего выполнять расчеты равновесных составов и количеств образующихся продуктов по алгоритму минимизации энергии Гиббса на основе представлений о металлургических расплавах как об идеальных ассоциированных растворах [19].

Полученные температурные зависимости вязкости шлаков представлены графически на рис. 1. Табл. 2 содержит результаты расчета фазового состава.

Таблица 1

## Химический состав экспериментальных шлаков

№	Состав шлака, %						
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>шл</sub>
1	41,50	41,50	0	8	3	6	1,0
2	59,29	23,71	0	8	3	6	2,5
3	46,43	18,57	18	8	3	6	2,5
4	32,50	32,50	18	8	3	6	1,0

## Результаты и обсуждение исследования

Таблица 2

## Фазовый состав шлаков

Фазы, %	T <sub>пл</sub> , °C	Шлаки			
		1	2	3	4
Низкотемпературные фазы					
CaO·B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1130	4	0,1	0,4	4,5
2CaO·B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1280	9	5	9	8
CaO·MgO·2SiO <sub>2</sub>	1391	9	0,03	0,2	8
Среднетемпературные фазы					
2CaO·MgO·2SiO <sub>2</sub>	1454	4	0,4	1	3
3CaO·B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1460	1	14	9	1
3CaO·2SiO <sub>2</sub>	1460	13	8	7	6
CaO·MgO·SiO <sub>2</sub>	1503	8	5	8	7
CaO·SiO <sub>2</sub>	1540	23	3	5	22
MgO·SiO <sub>2</sub>	1557	5	0,1	0,5	5
3CaO·MgO·2SiO <sub>2</sub>	1575	2	6	5	1
SiO <sub>2</sub>	1710	6	0,03	0,1	5
Высокотемпературные фазы					
2CaO·SiO <sub>2</sub>	2130	10	40	21	6
CaO·Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2170	0	0	20,5	7
MgO·Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2350	0	0	0,004	0,005
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2435	0	0	3	13
CaO	2570	0,2	6	2	0,2
MgO	2852	1	4	4	1

Как видно из рис. 1, большинство изученных шлаков (№№ 1, 2, 3) представляет собой т. н. «короткие» шлаки с явно выраженной точкой перегиба. Это объясняется фазовым составом изучаемой оксидной системы, а именно содержанием большого количества таких высокотемпературных соединений, как 2CaO·SiO<sub>2</sub> и CaO·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (табл. 2).

Первый шлак (шлак № 1), не содержащий Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обладающий основностью 1,0 и содержащий 6,0 % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, характеризуется значительной концентрацией легкоплавких фаз CaO·B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2CaO·B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO·MgO·2SiO<sub>2</sub> (в сумме до 22 %) при лишь 11 % тугоплавких соединений 2CaO·SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO, и имеет вязкость 0,2–0,6 Па·с в интервале 1200–1350 °C. При этом подавляющее количество фаз CaO·SiO<sub>2</sub>, CaO·MgO·SiO<sub>2</sub> и т. д. приходится на второй интервал (62 %), что обеспечивает быструю кристаллизацию несмотря на низкую основность.

Повышение основности шлака без Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (шлак № 2), содержащего 6,0 % оксида бора, до 2,5 сопровождается снижением до 5 % доли легкоплавких фаз (2CaO·B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и ростом доли соединений со средними и высокими температурами плавления до 43 и 50 % соответственно, что вызывает более «короткую» кристаллизацию при повышенной температуре (шлак № 2). Несмотря на увеличение доли легкоплавкой фазы 2CaO·B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 9 % в шлаке № 3, имеющем такую же основность, но содержащем 18 % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, рост количества высокотемпературных фаз 2CaO·SiO<sub>2</sub>, CaO, CaO·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO до 53 %



обеспечивает ему аналогичный характер кривой зависимости вязкости от температуры. При этом шлаки № 2 и № 3 имеют значения вязкости 0,07–1,0 Па·с в интервале 1650–1700 °С и до 1,0 Па·с при температуре 1670 °С соответственно.

Шлак № 4 является «длинным» и не имеет выраженной точки перегиба из-за низкой основности и большого количества оксидов-стеклообразователей  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ . Присутствие в шлаке изучаемой оксидной системы 18 % оксида хрома, действующего при основности 1,0 и более как комплексообразователь, увеличивает степень полимеризации шлака [17]. При незначительном снижении относительно шлака № 1 содержания легкоплавких фаз  $\text{CaO}\cdot\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$  до 21 % доля тугоплавких  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{MgO}$  растет до 27 % за счет соединений со средней температурой плавления, приводя к гетерогенизации оксидной системы и вязкости до 0,1–1,0 Па·с при повышенной до 1450–1570 °С температуре.

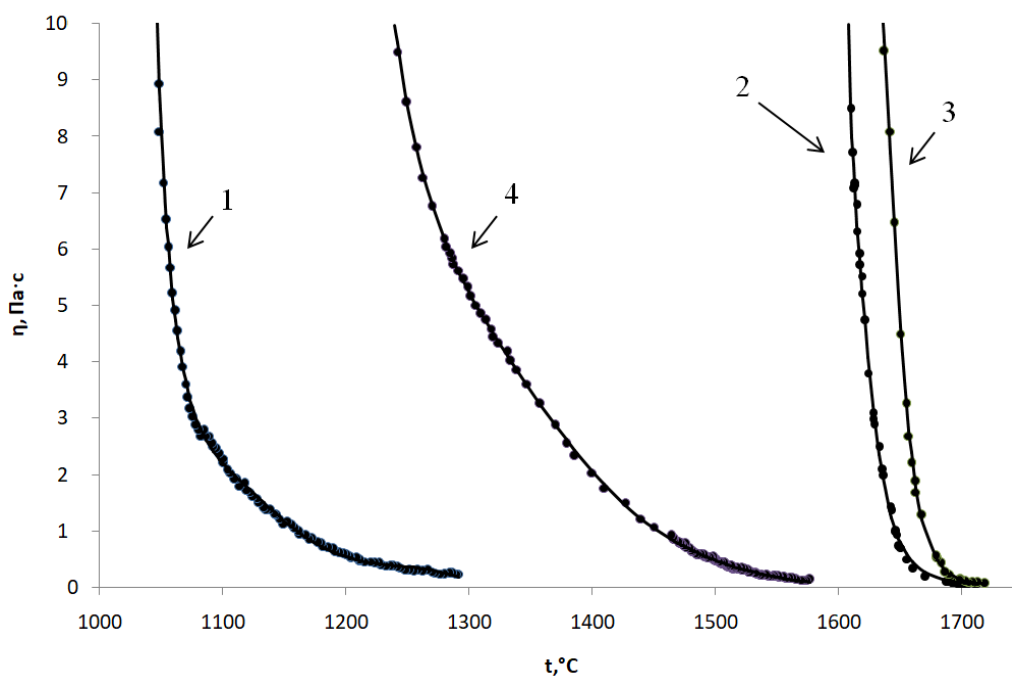


Рис. 1 Температурная зависимость вязкости шлаков

### Заключение

В результате исследования физических свойств шлаков изучаемой оксидной системы установлено, что оксид бора обеспечивает формирование легкоплавких фаз и достаточно высокую жидкоподвижность шлаков системы  $\text{CaO}\text{--}\text{SiO}_2\text{--}\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}\text{MgO}\text{--}\text{B}_2\text{O}_3$  даже при высоком содержании оксида хрома. Добавление 18 % оксида хрома, действующего при основности 1,0 и более как комплексообразователь, увеличивает степень полимеризации шлака и долю высокотемпературных фаз в шлаках изучаемой оксидной системы, сопровождается их гетерогенизацией и ростом вязкости.

*Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН.*

### Библиографический список

1. Атлас шлаков : справ. изд. Пер. с нем. – Москва : Металлургия, 1985. – 208 с.
2. Токовой О. К. Аргонокислородное рафинирование нержавеющей стали: монография. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 250 с.
3. Wu T., Yuan F., Zhang Y. Viscosity measurements of  $\text{CaO}\text{--}\text{SiO}_2\text{--}\text{CrO}$  Slag // ISIJ International. – 2018. – Vol. 58, No. 2. – P. 367–369.
4. Liu Zh., Dekkers R., Blanpain B., Guo M. Experimental Study on the Viscosity of Stainless Steelmaking Slags // ISIJ International. – 2019. – Vol. 59, No. 2. – P. 404–411.

5. Магидсон И. А. Вязкость хромистых шлаков / И. А. Магидсон, А. С. Морозов, М. Ф. Сидоренко [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1973. – № 11. – С. 61–64.
6. Kalicka Z., Kawecka-Cebula E., Pytel K. Application of the Iida Model for Estimation of Slag Viscosity for  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-CaO-CaF}_2$  Systems // Arch. Metall. Mater. – 2009. – Vol. 54, No. 1. – P. 179–187.
7. Дюдкин Д. А. Внепечная металлургия стали / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко. – Москва : Теплотехник, 2010. – 544 с.
8. Акбердин А. А. Физические свойства расплавов системы  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO-CaF}_2$  / И. С. Куликов, В. А. Ким [и др.]. – Москва : Металлургия, 1987. – 144 с.
9. Поволоцкий Д. Я. Влияние  $\text{SiO}_2$  на летучесть шлаков системы  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$  / Рощин В. Е., Грибанов В. П. [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1982. – № 8. – С. 39–42.
10. Зайцев А. И. Физическая химия металлургических шлаков / А. И. Зайцев, Б. М. Могутнов, Е. Х. Шахпазов. – Москва : Интерконтакт Наука, 2008. – 352 с.
11. Hongming W., Tingwang Z., Hua Z. Effect of  $\text{B}_2\text{O}_3$  on Melting Temperature, Viscosity and Desulfurization Capacity of CaO-based Refining Flux // ISIJ International. – 2011. – Vol. 51, No. 5. – P. 702–706.
12. Акбердин А. А. Влияние  $\text{B}_2\text{O}_3$  на вязкость шлаков системы  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  / А. А. Акбердин, Г. М. Киреева, И. А. Медвековская // Известия АН СССР. Металлы. – 1986. – № 3. – С. 55–56.
13. Бабенко А. А. Вязкость шлаков системы  $\text{CaO - SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{B}_2\text{O}_3$  / А. А. Бабенко, С. А. Истомина, Е. В. Протопопов [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 2. – С. 41–43.
14. Hong-ming W., Gui-rong L., Bo L., Xue-jun Z., Yong-qi Y. Effect of  $\text{B}_2\text{O}_3$  on Melting temperature of CaO-Based Ladle Refining Slag // ISIJ International. – 2010. – Vol. 17, No. 10. – P. 18–22.
15. Акбердин А. А. Атлас диаграмм вязкости борсодержащих шлаков / А. А. Акбердин, Г. М. Киреева, И. А. Медвековская [и др.]. – Деп. в ВИНТИ. – 1986. – № 3971–В. – 27 с.
16. Wang, Wanlin & Cai, Dexiang & Zhang, Lei. (2018). A Review of Fluorine-free Mold Flux Development. ISIJ International. Vol.58, No.11. – P.1957–1964.
17. Li Q., Yang Sh., Zhang Y., An Zh., Guo Zh.Ch. Effects of  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , and  $\text{B}_2\text{O}_3$  on the viscosity and structure of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ -bearing  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  slags // ISIJ International. – 2017. – Vol. 57, No. 4. – P. 689–696.
18. Поволоцкий Д. Я. Производство нержавеющей стали / Д. Я. Поволоцкий, Ю. А. Гудим. – Челябинск : Изд-во ЮУрГУ, 1988. – 236 с.
19. Ватолин Н. А. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах / Н. А. Ватолин, Г. К. Моисеев, Б. Г. Трусов. – Москва : Металлургия, 1994. – 352 с.

## РАСЧЕТ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЕ С ДВУМЯ КЛАССИФИКАТОРАМИ

**Бараковских Дмитрий Сергеевич,**

E-Mail: [d.s.barakovskikh@urfu.ru](mailto:d.s.barakovskikh@urfu.ru),

Уральский федеральный университет,  
Институт новых материалов и технологий,

**Шишкин Сергей Федорович,**

E-Mail: [shsf@planet-a.ru](mailto:shsf@planet-a.ru),

Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Матричный метод расчета, основанный на материальном балансе по узким классам крупности, широко применяется для расчета гранулометрического состава готовых продуктов различных материалов в процессах измельчения и классификации. Данный метод используется, в т. ч., для расчета замкнутого цикла в струйной мельнице. В традиционной схеме замкнутого цикла струйной мельницы, для тонкого разделения продукта измельчения, применяется динамический центробежный классификатор. Циркуляционная нагрузка при этом может составлять до 5 и более. Это предполагает использование классификатора большой производительности, стоимость которого будет существенной долей в общей стоимости установки. Кроме этого, износ ротора динамического классификатора пропорционален количеству материала, т. е. производительности. Для устранения данных недостатков, в рамках матричной модели, предложена схема замкнутого цикла с двумя последовательными классификаторами. Причем, первый классификатор проходного типа, второй классификатор динамического. Применение данной схемы в производстве слюды, позволило снизить в 2 раза циркуляционную нагрузку на второй центробежный динамический классификатор для тонкого разделения материала. Получены уравнения, позволяющие определить гранулометрический состав и массовый выход продуктов разделения, кратность циркуляции, нагрузку на мельницу и классификаторы. Предложенная математическая модель позволяет рассчитать оптимальные границы разделения каждого классификатора.

**Ключевые слова.** Матричный метод, замкнутый цикл, струйная мельница, эжектор, измельчение, классификатор.

Матричная модель, в основе которой лежит материальный баланс по узким классам крупности, используется во многих работах по измельчению. В работе [1] матрица разрушения использовалась для прогнозирования размеров частиц песков известняка в результате разрушения частиц при одномерном сжатии. В работе [2] матрицы использовались для расчета размеров частиц гидраргиллита при измельчении в бисерной мельнице. Так же матричная модель была использована для прогнозирования продуктов разделения серпентинита в процессе воздушной классификации [3].

Данный метод расчета успешно применяется, в т. ч. для расчета замкнутого цикла измельчения в струйной мельнице и позволяет рассчитать гранулометрический состав готового продукта и циркуляционную нагрузку на мельницу и классификатор [4–6].

В соответствии с матричной моделью [7–8] гранулометрические составы интерпретируются с помощью понятия арифметического вектора  $g$ , компоненты которого, представляют собой частные остатки узких классов  $\{r_1, r_2, r_3, \dots, r_i, \dots, r_n\}$ . Процесс измельчения в открытом цикле описывается матричным уравнением (1), которое представляет собой материальный баланс по узким классам крупности.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 0 & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & a_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{z1} \\ r_{z2} \\ \vdots \\ r_{zn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $r_{zi}$ ,  $r_i$  – соответственно содержание частиц  $i$ -го класса крупности в исходном и измельченном продуктах;  $a_{ij}$  – доля  $i$ -го класса крупности перешедшая в более мелкий  $j$ -й класс ( $i$ -строка,  $j$ -столбец).

Формально уравнение (1) представляет собой преобразование вектора исходного состава  $r_z$  в вектор готового продукта  $r$ . Поскольку в процессе измельчения отдельный узкий класс  $r_{zi}$  может в результате измельчения перейти только в более мелкие классы, то матрица  $A$  – треугольная. Матрицу  $A$  определяют экспериментально. Например, для струйной мельницы отдельно измельчают  $r_{zi}$ -й узкий класс крупности, и определяют долю  $a_{ij}$  перешедшую в более мелкий  $j$ -й класс ( $i \leq j$ ). При рассмотрении замкнутого цикла измельчения уравнение материального баланса (1) усложняется, т. к. надо учитывать возникающие циркуляционные потоки, которые зависят от выбранной схемы.

Традиционная схема замкнутого цикла измельчения, включающая струйную мельницу и классификатор, широко применяется на практике [9–10]. При тонком измельчении циркуляционная нагрузка может составлять до 5 и более. В этом случае, например, при производительности по исходному питанию 1 т/ч классификатор должен обладать производительностью 5 т/ч. Поскольку, для тонкого разделения применяются динамические центробежные классификаторы, то очевидно, что стоимость классификатора большой производительности будет существенной долей в общей стоимости установки замкнутого цикла. Кроме этого известно, что износ ротора динамического классификатора пропорционален количеству материала, т. е. производительности. Для устранения данных недостатков, предложена новая схема замкнутого цикла с двумя последовательными классификаторами (рис. 1). Для построения балансной математической модели данной схемы, произведем замену и расчет двух классификаторов одним комбинированным каскадным классификатором (рис. 2).

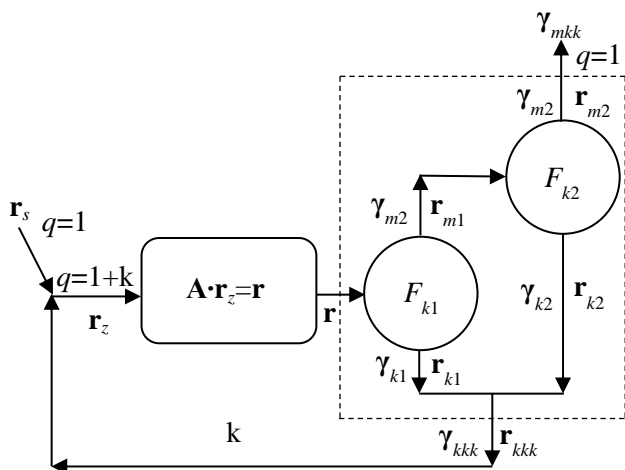


Рис. 1 Расчетная схема замкнутого цикла с двумя классификаторами

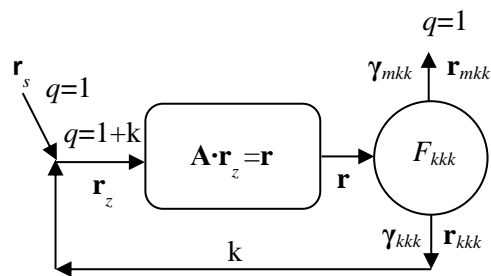


Рис. 2 Комбинированный каскад из двух классификаторов

На схемах приняты следующие обозначения:

$r_s$ ,  $r_m$ ,  $r_k$  – векторы гранулометрического состава соответственно исходного материала, мелкого и крупного продуктов разделения;

$r_z$ ,  $r$  – векторы гранулометрического состава материала, соответственно поступающего на вход мельницы и классификатора;

$\Gamma_{m1}, \Gamma_{m2}, \Gamma_{k1}, \Gamma_{k2}, \Gamma_{mkk}, \Gamma_{kkk}$  – векторы гранулометрического состава мелкого и крупного продуктов разделения соответственно для первого, второго классификаторов и комбинированного каскада;

$q$  – поток массы материала, принимаемый на входе и выходе  $q = 1$ .

$A$  – матрица разрушения для струйной мельницы;

$F_{k1}, F_{k2}, F_{kkk}$  – функция степени фракционного извлечения узких классов крупности в крупный продукт разделения соответственно для первого, второго классификаторов и комбинированного каскада.

$\gamma_{m1}, \gamma_{m2}, \gamma_{k1}, \gamma_{k2}, \gamma_{mkk}, \gamma_{kkk}$  – массовый выход мелкого и крупного продуктов разделения соответственно для первого, второго классификаторов и комбинированного каскада.

Теория комбинированных каскадных классификаторов хорошо разработана [11–13]. Из этой теории следует, что несколько взаимосвязанных классификаторов можно заменить одним комбинированным каскадным классификатором, имеющим соответствующую степень фракционного извлечения  $F_{kkk}$ . Функция степени фракционного разделения в крупный продукт для комбинированного каскадного классификатора реализующего последовательную перемелку мелкого продукта будет описываться функцией

$$F_{kkk} = 1 - F_{mkk} = 1 - (1 - F_{k1})(1 - F_{k2}) = F_{k1} - F_{k1} \cdot F_{k2} + F_{k2} \quad (2)$$

Если функцию степени фракционного извлечения в крупный продукт разделения аппроксимировать зависимостью Плитта, то в уравнении (3)  $F_{k1}$  и  $F_{k2}$  будут иметь вид

$$F_{k1}(x_j) = \frac{(x_j/c_1)^{p_1}}{1 + (x_j/c_1)^{p_1}} \text{ и } F_{k2}(x_j) = \frac{(x_j/c_2)^{p_2}}{1 + (x_j/c_2)^{p_2}}, \quad (3)$$

где  $x_j$  – средний размер класса  $j$  крупности;  $c_1, c_2$  – размер граничного зерна (граница разделения  $x_{50}$ ) для классификатора 1 и 2;  $p_1, p_2$  – параметр эффективности разделения для классификатора 1 и 2.

Массовые выходы крупного и мелкого продуктов для комбинированного каскада определяется по формулам:

$$\gamma_{kkk} = \sum_{j=1}^n r_j F_{kkk}(x_j) = \sum_{j=1}^n r_j (F_{k1}(x_j) - F_{k1}(x_j) \cdot F_{k2}(x_j) + F_{k2}(x_j)) \quad (4)$$

$$\gamma_{mkk} = \sum_{j=1}^n r_j [1 - F_{kkk}(x_j)] \quad (5)$$

При этом кратность циркуляции найдется по известной зависимости:

$$k = \frac{\gamma_{kkk}}{100 - \gamma_{kkk}} \quad (6)$$

Нагрузка на мельницу и первый классификатор по массе в долях от питания найдется по зависимости

$$q_n = 1 + k \quad (7)$$

Нагрузка на второй классификатор по массе в долях от питания будет ниже и найдется по зависимости

$$q_2 = q_n \frac{\gamma_{m1}}{100} \quad (8)$$

Гранулометрический состав готового продукта можно вычислить по формуле

$$\Gamma_{mkj} = \frac{100 \cdot (1 - F_{kkk}(x_j)) \cdot r_j}{100 - \gamma_{kkk}} \quad (9)$$

Гранулометрический состав материала (частные остатки класса  $j$  крупности), поступающего на измельчение, можно определить зависимостью

$$r_{zj} = \frac{r_{sj} + r_{kkkj} \cdot k}{1 + k} \quad (10)$$

Выражая  $k$  через  $\gamma_k$ , получим

$$r_{zj} = \frac{100 - \gamma_{kkk}}{100} r_{sj} + \frac{\gamma_{kkk}}{100} r_{kkkj} \quad (11)$$

Гранулометрический состав крупного продукта разделения определяется по зависимости

$$r_{kkkj} = 100 F_{kkkj} \frac{r_j}{\gamma_{kkk}} \quad (12)$$

С учетом этого гранулометрический состав материала, поступающего на измельчение, можно определить

$$r_{zj} = \frac{r_{sj} (100 - \gamma_{kkk})}{100} + F_{kkkj} r_j \quad (13)$$

После преобразования система (1) примет вид

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n c_1 F_{kkkj} r_j - \sum_{j=1}^n a_{1j} F_{kkkj} r_j + r_1 = b_1 \\ \sum_{j=1}^n c_2 F_{kkkj} r_j - \sum_{j=1}^n a_{2j} F_{kkkj} r_j + r_2 = b_2 \\ \dots \dots \dots \\ \sum_{j=1}^n c_n F_{kkkj} r_j - \sum_{j=1}^n a_{nj} F_{kkkj} r_j + r_n = b_n \end{cases} \quad (14)$$

где коэффициенты  $b_i$  и  $c_i$ :

$$b_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} r_{sj} \text{ и } c_i = \frac{b_i}{100} \quad (15)$$

Таким образом, полученные уравнения позволяют рассчитать гранулометрические составы продуктов и циркуляционную нагрузку на мельницу и оба классификатора. Данная модель была применена при проектировании установки струйного измельчения слюды в замкнутом цикле с двумя классификаторами на АО «Малышевское рудоуправление».

Схема установки струйного измельчения для помола слюды, представлена на рис. 3. Производительность установки составляет 300 кг/ч. В схеме использовано два последовательно установленных классификатора. Первый центробежный классификатор статический проходной, второй – центробежный динамический с вращающимся ротором.

Схема включает в себя: 1 – бункер исходного материала; 2 – шнековый питатель; 3 – приемный бункер; 4 – поворотная заслонка подачи сжатого воздуха; 5 – ресивер; 6 – манометр; 7 – струйная мельница; 8 – сверхзвуковое сопло; 9 – разгонная трубка; 10 – камера помола; 11 – преграда; 12 – проходной классификатор ( $D_y = 1000$  мм); 13 – рукавный клапан; 14 – центробежный классификатор типа «СЕЛЕКТОР-500/1500» ( $D = 500$  мм,  $n = 960$  об/мин,  $N_{\text{дв}} = 12$  кВт, частотный привод); 15 – циклон типа ЦН-15 ( $D = 800$  мм); 16 – циклон типа СДК ЦН-33 ( $D = 1200$  мм); 17 – поворотная заслонка; 18 – диафрагма; 19 – рукавный фильтр ( $F_{\phi} = 120$  м<sup>2</sup>); 20 – вентилятор типа ВР-132-30-10,2 (исполнение 5,  $n = 1650$  об/мин,  $N_{\text{дв}} = 45$  кВт, частотный привод).

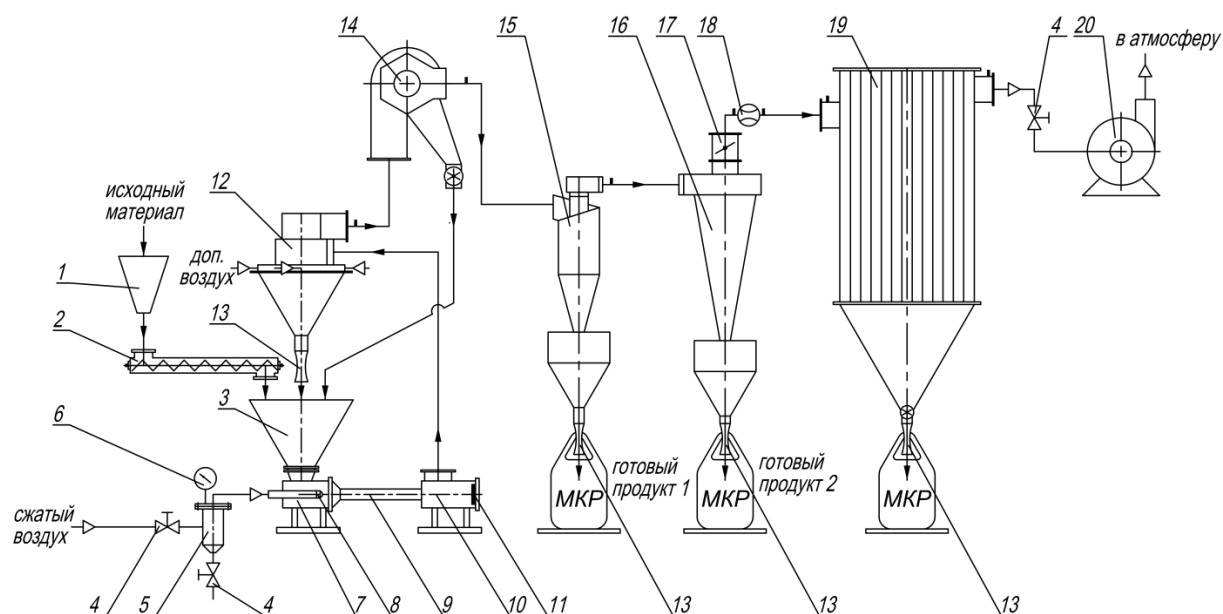


Рис. 3 Технологическая схема струйного измельчения в замкнутом цикле с двумя классификаторами для помола слюды на АО «Малышевское рудоуправление»

Гранулометрические составы исходного материала и готовых продуктов слюды приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Гранулометрический состав продуктов

Сита	Исх. материал			Циклон 1 (ЦН-15)			Циклон2 (СДК-ЦН-33)			Объединенный продукт		
	R,%	D,%	r,%	Rm1,%	Dm1,%	rm1,%	Rm2,%	Dm2,%	rm2,%	Rm3,%	Dm3,%	rm3,%
<b>1000</b>	1.4	98.6	1.4	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0
<b>630</b>	7.6	92.4	6.2	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0	0.0
<b>400</b>	19.3	80.7	11.6	0.2	99.8	0.2	0.0	100.0	0.0	0.2	99.8	0.2
<b>315</b>	26.9	73.1	7.6	0.2	99.8	0.0	0.0	100.0	0.0	0.2	99.8	0.0
<b>200</b>	47.4	52.6	20.5	0.8	99.2	0.6	1.4	98.6	1.4	0.9	99.1	0.7
<b>160</b>	57.4	42.6	10.0	1.6	98.4	0.8	2.2	97.8	0.8	1.7	98.3	0.8
<b>100</b>	73.7	26.3	16.3	6.5	93.5	4.9	2.9	97.1	0.6	6.1	93.9	4.4
<b>63</b>	83.5	16.5	9.8	14.0	86.0	7.5	4.3	95.7	1.4	13.0	87.1	6.8
<b>40</b>	93.8	6.2	10.2	35.1	64.9	21.1	10.2	89.8	5.9	32.4	67.6	19.5
<b>0</b>	100.0	0.0	6.2	100.0	0.0	64.9	100.0	0.0	89.8	100.0	0.0	67.6

Из представленных данных следует, что при использовании замкнутой схемы с двумя классификаторами, возможно получение трех продуктов различной крупности: из циклона 15 типа ЦН-15 – фракция 0–63 мкм (содержание <63 мкм 86 %); из циклона 16 типа СДК-ЦН-33 – фракция 0–40 мкм (содержание <40 мкм 89,8 %); либо объединенный циклонный продукт. В результате струйного помола насыпная масса слюды снижается с 672,8 кг/м<sup>3</sup> до 377,0 кг/м<sup>3</sup> (продукт № 1) и 303.6 кг/м<sup>3</sup> (продукт № 2).

Кратность циркуляции первого классификатора составила  $k_1 = 2,1$ , второго  $k_2 = 1,1$ . В результате суммарная нагрузка по производительности на первый классификатор и мельницу составила  $q_1 = 4,2$ , на второй классификатор  $q_2 = 2,1$ , таким образом удалось в 2 раза снизить нагрузку на динамический классификатор для тонкого разделения материала. Эффективность разделения первого проходного классификатора по

показателю Эдера-Майера ( $E = 100 \cdot x_{75}/x_{25}$ ) составила  $E_{k1} = 12,69$  % при границе разделения  $c_1 = 34,5$  мкм. Эффективность второго динамического центробежного классификатора  $E_{k2} = 20,34$  % при границе разделения  $c_2 = 21,7$  мкм. Суммарная эффективность комбинированного каскада  $E_{kk} = 23,67$  % при границе разделения  $c_{kk} = 12,4$  мкм.

Достаточно низкая эффективность разделения объясняется тем, что частицы слюды имеют плоскую форму. Вследствие этого массовая сила и сила сопротивления пропорциональны размеру частиц, что объективно не позволяет качественно разделять слюду по крупности методом воздушной классификации. Однако, несмотря на ограниченную эффективность разделения, установка позволяет за счет изменения границ разделения  $x_{50}$  на первом и втором классификаторах регулировать тонкость готового продукта.

#### Библиографический список

1. Tong C. X. A breakage matrix model for calcareous sands subjected to one-dimensional compression / C.X. Tong, S. Zhang, D.A. Sheng // *Fundamentals of Soil Behaviours : 4th GeoShanghai Int. Conf.*, 27-30 may. 2018.– Shanghai, 2018.– P. 17–24.
2. Berthiaux H. Approximate calculation of breakage parameters from batch grinding tests / H. Berthiaux, C. Varinot, J. Dodds // *Chemical Engineering Science*. – 1996.– Vol. 51.– P. 4509–4516.
3. Пономарев В. Б. Аналитическое прогнозирование процесса воздушной классификации серпентинита для ОАО «Русский магнит» / В. Б. Пономарев, В. Я. Дзюзер, В.Л. Данилов [и др.] // *Огнеупоры и техническая керамика*.– 2010. – № 9. – С. 12–15.
4. Шишкин С. Ф. Расчет замкнутого цикла измельчения для струйной мельницы / С. Ф. Шишкин, И. В. Калина // *Вестник УГТУ–УПИ. Строительство и образование*. – 2003. № 6. – С. 279–283.
5. Жуков В. П. Расчетно-экспериментальные исследования процессов в струйных мельницах кипящего слоя / В. П. Жуков, Н. Otwinovski, С. Ф. Смирнов [и др.] // *Вестник ИГЭУ*.– 2009.– №. 4.– С. 74–77.
6. Серебряник И. А. Моделирование процесса струйного помола с учетом особенностей механики деформации слюды / И. А. Серебряник // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2015.– № 6.– С. 39–44.
7. Gupta A. Mathematical modelling of comminution processes / A. Gupta, D. Yan // *Mineral processing and operations* – 2016. – № 2.– С. 317–355.
8. Линч Дж. 1981 Циклы дробления и измельчения / Дж. Линч. – Москва : Недра, 1981. – 343 с.
9. Шишкин С. Ф. Расчет процесса измельчения в замкнутом цикле / С. Ф. Шишкин, С. М. Техов // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 1991. – №. 24. – С. 117–119.
10. Жуков В. П. Математическая модель и метод расчета динамического классификатора / В. П. Жуков, А. А. Андреев, Н. Otwinovski [и др.] // *Изв. вузов : Химия и химич. технол.* – 2006. – Вып. 5, т. 49. – С. 99–102.
11. Barsky E. Critical regimes of two-phase flows with a polydisperse solid phase *Fluid Mechanics and Its Applications* / E. Barsky. – vol 93 – New York: Springer, 2010.– 348 p. – ISBN 978-90-481-8837-6.
12. Мизонов В. Е. Аэродинамическая классификация порошков / В. Е. Мизонов. – Москва: Химия, 1989. – 160 с.
13. Пономарев В. Б. Расчет и проектирование оборудования для воздушной сепарации сыпучих материалов / В. Б. Пономарев.– Екатеринбург : Уральский фед. универ., 2015.– 79 с. – ISBN 978-5-7996-1997-8.



## ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ СУЛЬФИДНОГО МЕДНОГО КОНЦЕНТРАТА В ПАП НА КИСЛОРОДНОМ ДУТЬЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОННЫХ ФУРМ

**Булатов Константин Валерьевич,**  
ОАО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург,

**Якорнов Сергей Александрович,**  
УГМК, г. В. Пышма,

**Ибрагимов Андрей Фаритович,**

**Исхаков Ильфат Ильдусович,**

E-Mail: mmsk@ugmk.com,

ООО «Медногорский медно-серный комбинат»,  
г. Медногорск

**Аннотация.** Приведены результаты промышленных испытаний плавки сульфидных медных концентратов на технологическом кислороде с использованием боковых и донных фурм с защитной газовой оболочкой в плавильном агрегате «Победа» (ПАП) в ООО «ММСК». На основе анализа условий работы ПАП интерпретированы основные результаты опытных плавок. Показана возможность достижения максимальной производительности по шихте до 475 т/сутки при удельном расходе кислорода на донные фурмы 3250–3450 м<sup>3</sup>/ч. Содержание меди в шлаках изменяется в интервале значений 2,5–3,0 %, а концентрация меди в штейне 38–68 %, содержание SO<sub>2</sub> в отходящих газах 12–24 об. %. Кампания донных фурм составляет 4–6 сут.

**Ключевые слова.** Плавильный агрегат «Победа»; донная фурма; кислородное дутье; удельная производительность; плавка; шихта; продувка.

**Методика промышленных испытаний.** Совмещенная плавка медного и полиметаллического сульфидного сырья (СПК), используется в отечественной цветной металлургии с 1995 г. и называется «Победа» (ПАП) [1–4]. При эксплуатации ПАП применяли дутье со сравнительно низкой концентрацией кислорода (23–27 % об.). Целью настоящих исследований является оценка работы плавильного агрегата на технологическом кислороде (95 % об. O<sub>2</sub>).

При проведении промышленных испытаний подачу кислорода осуществляли с помощью донных фурм (диаметр внутр. 36 мм), оснащенных защитной газовой оболочкой конструкции «труба в трубе» (толщина щели 4,5 мм), расположенных в два ряда под разными углами наклона относительно вертикальной оси ПАП с шагом 500 мм. Использовали также боковые фурмы без защитной оболочки с подачей только дутьевого воздуха. Взаимное расположение боковых и донных фурм показано на фото с внутренней стороны футеровки (рис. 1).



Рис. 1 Взаимное расположение донных и боковых фурм (вид с внутренней стороны футеровки)

Под кислородным дутьем обычно находились 4 донные фурмы. Параметры работы донных фурм представлены в табл. 1. При плавках дутье перераспределяли, увеличивая число работающих донных и сокращая количество действующих боковых фурм.

Таблица 1  
Параметры работы донных фурм

Наименование	ДФ № 2 с ВОПР (воздух)	ДФ № 3	ДФ № 4	ДФ № 5
		(кислород)		
Расход кислорода на основной канал, $\text{нм}^3/\text{ч}$	–	800–1000	800–1000	500–1000
Давление кислорода на основной канал фурмы, МПа	–	0,35–0,38	0,35–0,38	0,35–0,38
Расход компрессорного воздуха на основной канал, $\text{нм}^3/\text{ч}$	800–1000	–	–	–
Давление компрессорного воздуха на основной канал, МПа	0,36–0,42	–	–	–
Расход компрессорного воздуха на защитную оболочку, $\text{нм}^3/\text{ч}$	800–1000	800–1000	800–1000	800–1000
Давление компрессорного воздуха на защитную оболочку, МПа	0,36–0,42	0,36–0,42	0,36–0,42	0,36–0,423
Температура воды на входе в фурму, °С	25–35	–	–	–
Температура воды на выходе из фурмы, °С	32–38	–	–	–
Разрежение воды на входе в фурму, МПа	0,014–0,041	–	–	–

По центральной трубе подавали технологический кислород, а по межтрубной полости компрессорный воздух. Одна фурма (№ 2) оборудована системой водяного охлаждения, работающей под разрежением (ВОПР), на которой в качестве защитного и основного газов использовали компрессорный воздух. Объем кислорода воздуха, вводимого через 11 боковых фурм, изменялся в интервале 750–5250  $\text{м}^3/\text{ч}$ . В ходе промышленных испытаний осуществляли хронометраж основных операций, начиная с заливки штейна шахтных печей и загрузки шихты, до выпуска богатой массы. Проводили отбор проб расплавов шлака и штейна (богатой массы) и с помощью самопишущих приборов непрерывно регистрировали основные параметры плавки (масса шихты, флюсов, температура газов под напыльником, расход воздуха).

Отдельно контролировали расход газов, давление на фурмоколлекторе (фурмах) и оптическим пирометром оценивали температуру расплавов шлака и штейна при выпуске, определяли химический состав продуктов плавки. После слива расплава из агрегата проводили замеры толщины футеровки в местах установки донных фурм.

Состав шихты и составляющих ее материалов показаны в табл. 2, 3.

#### **Обсуждение результатов испытаний**

В течение всего периода испытаний (29 сут.) фурмы работали стабильно и обеспечивали заданную пропускную способность газов. Во время технологической операции слива шлака через горловину и при нахождении донных фурм в расплаве во избежание их заливки, давление кислорода и компрессорного воздуха уменьшали до значений 0,10–0,15 МПа.

Таблица 2  
Состав шихтовых материалов

Наименование	Содержание, %								
	Влага	Cu	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe	Zn	Pb	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Медный концентрат производства ПАО «Гайский ГОК»	7,9	19,3	2,1	0,5	33,1	2,5	0,1	0,5	1,3
Медный концентрат производства ООО «Семеновский рудник»	7,3	18,7	3,8	0,5	26,7	9,1	0,6	0,5	3,1
Отсев сульфидного брикета	1,5	18,2	2,2	0,9	31,3	2,7	0,9	0,6	1,3
Медный кек	21,5	11,9	4,1	6,5	19,1	10,6	10,8	1,3	1,5
Медьсодержащий остаток с рукавных фильтров АО «Уралэлектромедь»	8,0	7,1	3,8	1,2	8,6	15,6	14,0	2,7	1,3
Золы электрофильтров ОАО «СУМЗ»	0,3	18,2	3,0	1,0	17,3	7,0	4,5	0,9	0,7
Пыль шахтных печей	0	15,3	5,7	1,7	27,6	2,9	1,7	0,7	2,5
Пыль конвертерная	0	26,0	5,0	0,5	12,5	4,0	6,8	0,8	2,0
Флюсы	0,7	4,7	43,0	0,7	12,7	4,8	0,1	2,0	13,7

В табл. 3 выборочно приведены показатели работы ПАП при 4-х одновременно работающих донных фурмах. Из данных табл. 3 следует, что наиболее высокая производительность по шихте без учета незавершенного производства составляет 461,2 и 475,1 т/сут (плавки №№ 5, 3), при этом соответственно получено 112,0 и 106,4 т штейна (37,9; 44,3 % Cu), 140 и 168 т шлака (2,5 и 3,0 % Cu). В этом режиме продувку осуществляли с подачей на ДФ № 2 воздуха и ДФ №№ 3–5 кислорода. Суммарный расход кислорода на основной канал фурм составлял 3250–3450 м<sup>3</sup>/ч. Загрузку шихты проводили в период слива штейна через шпур. В этот период испытаний богатую массу не получали. В плавках с выпуском богатого штейна содержание в нем меди составляло 60–70 %.

Температура отходящих газов под напыльником изменялась в интервале 650–700 °С, концентрация SO<sub>2</sub> в газах 14–22 % об., температура штейна 1040–1080 °С, шлака 1170–1200 °С. Средний проплав шихты составил 303,9 т/сут, а коэффициент нахождения ПАП под дутьем 78,3 %.

Таблица 3  
Показатели работы ПАП

№ плавки	% под дутьем	Штейн шахтных печей, т	Пыль конвертерная, т	Переработано, т/сут						Флюсы, т	Всего шихты, т	Штейн/шихта, т/т	Получено, т/сут		
				Отсев брикета	Медный конц-т «Гайский ГОК»	Медный конц-т «Семеновский рудник»	Шихта сульфидная	Прочие	Общая масса				Богатая масса	Шлак	
1	82	28	36,6	44,0	127,0	0,0	159,0	6,0	70,0	372,6	0,075	56,0	91,2	154,0	
2	65	28	26,7	98,5	107,0	36,1	8,5	0,0	65,0	276,7	0,101	91,0	60,8	11,2,0	
3	82	14	35,1	0,0	0,0	440,0	0,0	0,0	65,0	475,1	0,029	106,4	0,0	168,0	
4	58	28	21,1	0,0	270,0	0,0	0,0	8,0	55,0	299,1	0,094	77,0	44,8	91,0	
5	84	0	26,5	121,0	271,0	0,0	0,0	42,7	60,0	461,2	0,000	112,0	0,0	140,0	
6	67	28	23,9	79,0	65,0	0,0	0,0	32,0	25,0	199,9	0,140	42,0	48,0	91,0	
7	81	28	28,7	57,0	114,0	0,0	0,0	19,0	40,0	218,7	0,128	98,0	0,0	77,0	
<b>Ср</b>	<b>78</b>	<b>25,6</b>	<b>27,9</b>	<b>78,3</b>	<b>130,0</b>	<b>37,1</b>	<b>13,2</b>	<b>24,4</b>	<b>46,4</b>	<b>303,9</b>	<b>0,089</b>	<b>71,1</b>	<b>42,3</b>	<b>132,3</b>	

На рис. 2 показан общий вид типичный для испытаний результат регистрации некоторых производственных показателей самопишущих приборов в ходе хронометража. Из диаграммы следует, что температура газов перед напыльником (фрагмент Г) увеличивается с началом загрузки шихты (фрагмент А), причем первоначально наблюдается восходящий участок кривой, постепенно переходящий в дрейфующую относительно 500–600 °С линию. Данное обстоятельство может объясняться различными закономерностями процессов тепло-массообмена при нагреве и плавлении шихты, а также кинетическими особенностями протекания гетерогенных экзотермических реакций окисления ее сульфидных составляющих.

Результаты хронометража показали, что при эксплуатации ПАП без донных фурм, период от завершения загрузки кварцевого флюса до слива шлака составлял 160–190 мин. При использовании 2-х донных фурм (ДФ № 2 на воздухе и ДФ № 3 на кислороде) это время уменьшается до 90–110 мин, а при продувке расплава с помощью 4-х (ДФ № 2 и ДФ № 3–5 на кислороде) – снижается до 40–60 мин.

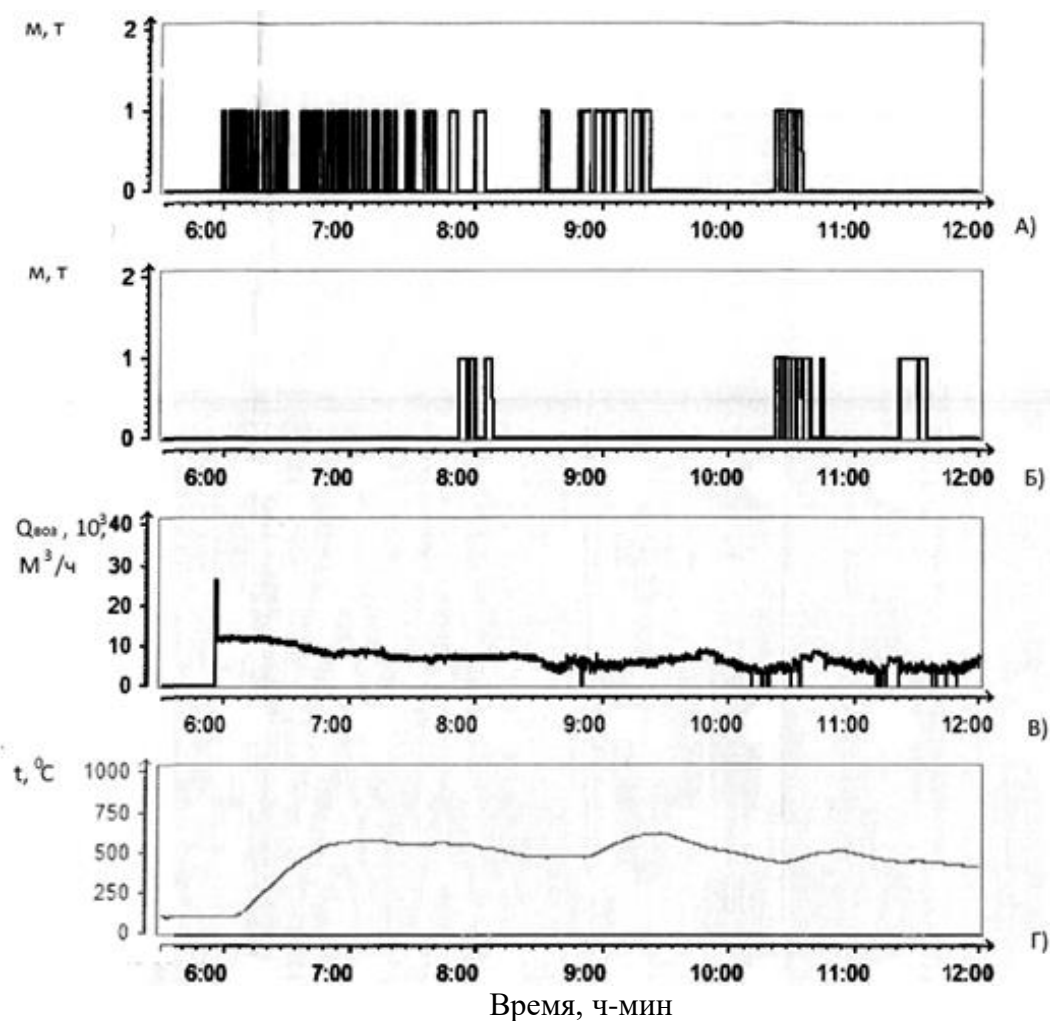


Рис. 2 Подача шихты (А), флюсов (Б), общий расход воздуха на боковых фурмах (В), температура газов перед напыльником (Г) по ходу испытаний

Таким образом, производительность плавки на кислородном дутье при использовании 4-х донных фурм повышается более чем в 3 раза и пропорциональна количеству подаваемого кислорода.

Увеличение проплава по шихте ~ на 36 % отн. за весь период испытаний (табл. 3) по сравнению со средним значением обусловлено более высоким коэффициентом нахождения ПАП под дутьем, а также интенсивным плавлением шихты за счет ввода

в расплав большего количества кислорода. Об этом свидетельствуют результаты математической обработки данных показывающие, что удельная производительность плавки закономерно растет с увеличением общего объема кислорода, подаваемого на донные фурмы, включая оболочку (рис. 3).

Зависимость удельного проплава от условий работы ПАП, принятых согласно номеру плавки, табл. 3 и представленная на рис. 4, обнаруживает экстремальный характер кривой. Для исследования особенностей данного периода из общего массива данных выбраны значения, соответствующие постоянному количеству перерабатываемого штейна шахтных печей 28 т. и описывающие функцию на восходящем (плавки №№ 1, 3), экстремальном (плавка № 4) и нисходящем участках кривой (плавки №№ 6, 7). Анализ условий испытаний в данной выборке значений показывает, что последние отличались общим на фурмах расходом кислорода и содержанием серы, железа в шихте, влияющие на тепловой режим плавки.

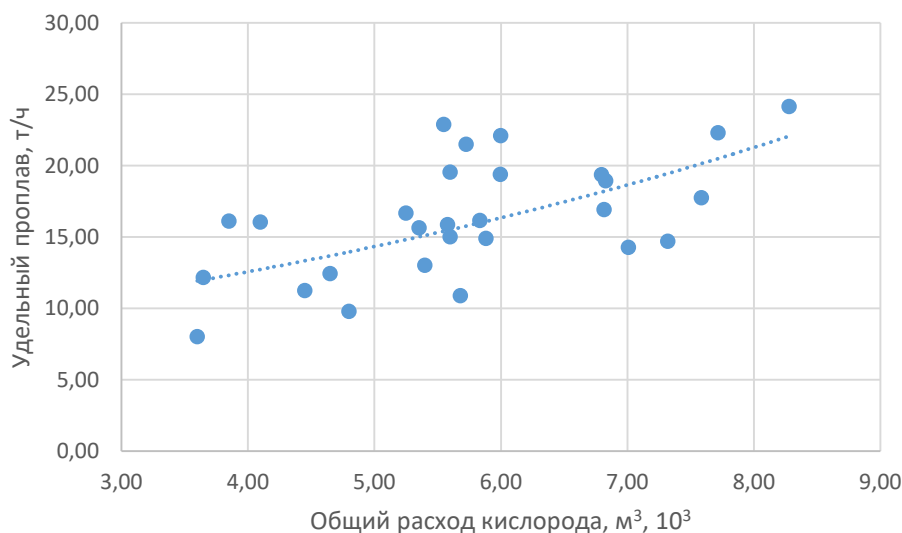


Рис. 3 Зависимость удельного проплава от общего расхода кислорода на фурмах

На рис. 5 представлена зависимость удельного проплава, приведенного на м³ кислорода от суммы серы и железа в указанных №№ плавков, которая поясняет отмеченную зависимость.

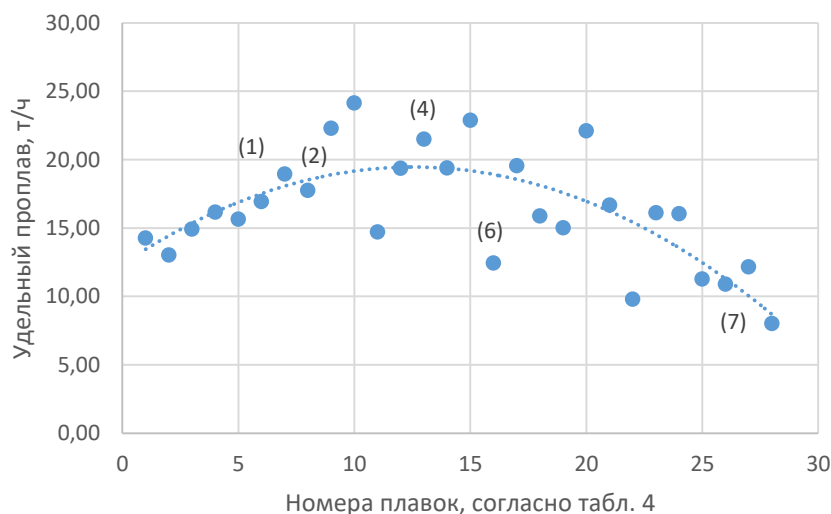


Рис. 4 Удельный проплав в зависимости от условий плавки (надписи у точек номер плавки, согласно данным табл. 3)

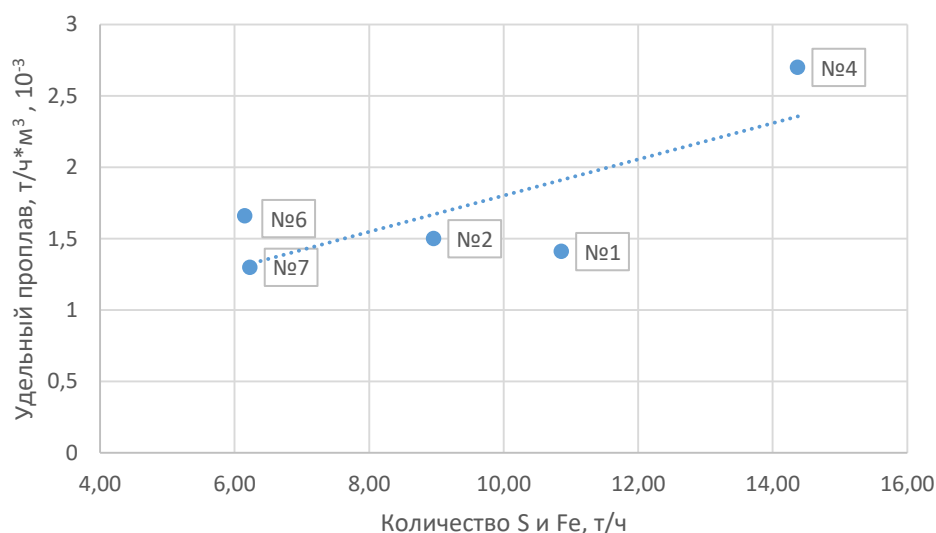


Рис. 5 Удельный проплав в зависимости от количества серы, железа шихты и условий плавки, согласно № плавки табл. 3

Влияние перераспределения дутья кислорода с боковых фурм  $Q_6$  к донным  $Q_d$  на величину удельного проплава, рассчитанного в зависимости от соотношения  $Q_d/Q_6$  и с учетом общего количества серы и железа в шихте, иллюстрируют данные рис. 6.

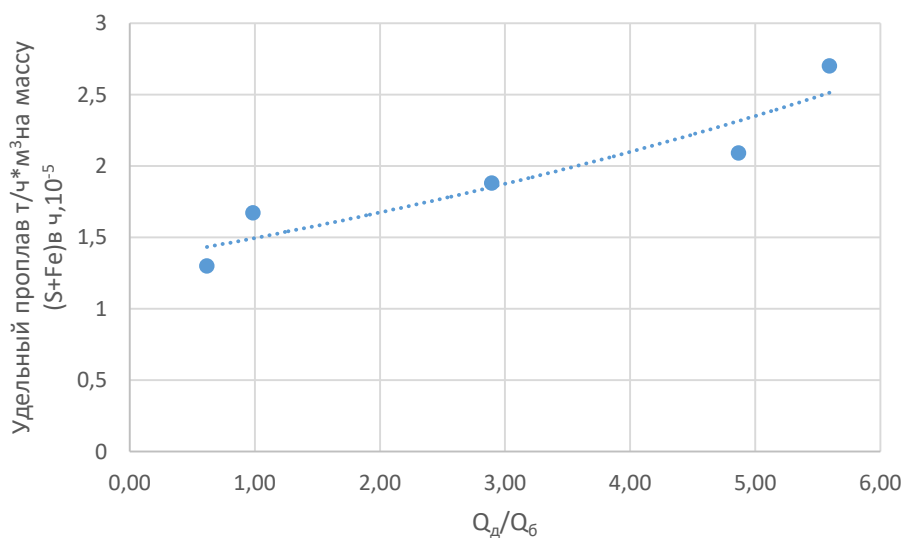


Рис. 6 Зависимость удельного проплава от соотношения дутья кислорода на донных фурмах к боковым

Из рис. 6 видно, что при прочих равных условиях (общий расход кислорода, состав шихты) увеличение дутья на донные фурмы повышает удельную производительность плавки. Это может объясняться более интенсивным перемешиванием ванны с участием донных струй, что увеличивает скорость процессов физико-химического растворения и соответственно плавления шихтовых материалов. В этой связи, представляется целесообразным дополнительное исследование гидрогазодинамических явлений, протекающих в жидкой ванне ПАП при обработке расплава комбинированным донным и боковым дутьем.

В период эксплуатации донных фурм после слива расплава периодически производили замеры толщины футеровки в зоне действия донных фурм. За период испытаний скорость износа огнеупоров увеличилась с 1,3–1,5 обычной технологии до

величин 3,7–5,9 мм/сут. Основными причинами повышенного износа огнеупоров следует считать периодичность плавки до получения богатого штейна и увеличение удельного расхода кислорода на 1 т шихты, что наряду с частыми теплосменами, приводит к локальному избытку тепла и разрушению защитного гарнисажа. Кампания донных фурм при этом составляла 4–6 сут.

#### **Заключение**

1. В условиях действующего агрегата ПАП на ООО «ММСК» проведены промышленные испытания плавки сульфидных медных концентратов на технологическом кислороде с использованием донных фурм с защитной газовой оболочкой.

2. На основе статистической обработки результатов промышленных испытаний выявлены основные факторы, влияющие на удельную производительность плавки.

3. Показана возможность увеличения производительности агрегата при расходе кислорода на донные фурмы 3250–3450 м<sup>3</sup>/ч до 475 т/сут в сравнении с обычной технологией 140–180 т/сут.

4. Выполнен химический анализ образцов продуктов плавки показывающий, что содержании меди в шлаках изменяется в интервале значений 2,5–3,0 %, концентрация меди в штейне варьируется от 38 до 68 %, содержание SO<sub>2</sub> в отходящих газах составляет 12–24 % об.

5. Отмечено, что температура отходящих газов под напыльником ПАП находится в интервале 650–700 °С и увеличивается после загрузки шихты; штейна 1040–1080 °С; шлака 1170–1200 °С.

6. Кампания донных фурм составляет 4–6 сут, а износ футеровки в зоне их действия 3,7–5,9 мм/сут.

*В работе принимали участие А. Н. Кириченко, С.С. Никитин (ООО «ММСК»), В. П. Жуков (ОАО «Уралмеханобр»), Г. В. Скопов (УГМК).*

#### **Библиографический список**

1. Булатов К. В. Практика переработки полиметаллических концентратов в ООО «ММСК» / К. В. Булатов, Г. В. Скопов, Г. П. Харитиди // Современные тенденции в области теории и практики переработки минерального и техногенного сырья : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург, 2014. – УНЦ УПИ. – С. 70–76.

2. Булатов К. В. Переработка полиметаллических концентратов в плавильном агрегате «Победа» ООО «Медногорский медно-серный комбинат» / К. В. Булатов, Г. В. Скопов, Д. Ю. Скопин // Цветные металлы. 2014. – № 10. – С. 39–44.

3. Пат. 2520292 РФ. Способ переработки сульфидных медно-свинцово-цинковых материалов / Г. В. Скопов, К. Е. Старков, Г. П. Харитиди, С. А. Якорнов, К. В. Булатов ; заявл. 10.12.2014; опубл. 20.06.2014. бюл. № 17.

4. Агеев Н. Г. Поиск оптимального распределения кислорода в системе плавильных агрегатов / Н. Г. Агеев, В. П. Жуков, К. В. Булатов, Д. Ю. Скопин // Цветные металлы. – 2013. – № 11. – С. 41–46.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ (АГЛОМЕРАТ И ОКАТЫШИ)

Витькина Галина Юрьевна,  
Дмитриев Андрей Николаевич,  
Алекторов Роман Владимирович,  
E-Mail: 20procents@mail.ru,  
Институт металлургии УрО РАН,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследований химического и фазового составов, металлургических характеристик основного железорудного сырья, используемого на доменных печах АО «ЕВРАЗ НТМК» – титаномагнетитового агломерата, полученного из руд Гусевогорского месторождения. Исследованы пробы агломерата с различной основностью – 2,1 и 2,4, а также с добавками связующих полимеров в размере 300 и 500 г на тонну агломерата. Приведены результаты промышленных испытаний производства и доменной плавки агломерата с различной основностью и добавками связующих полимеров на примере работы доменных печей № 5 и 6 АО «ЕВРАЗ НТМК».

**Ключевые слова.** Титаномагнетиты, железорудное сырье, агломерат, металлургические характеристики, прочность, доменная плавка, доменная печь.

## 1. Введение

Истощение запасов традиционного магнетитового (передельного) сырья вынуждает пересматривать отношение к способам производства металла и схемам переработки комплексных руд с учетом запросов рынка и использования ресурсов регионов. Руды с невысоким содержанием титана (Гусевогорское месторождение) перерабатываются по металлургической схеме, включающей выплавку чугуна в доменных печах АО «ЕВРАЗ НТМК».

Использование уральских титаномагнетитов заключается, прежде всего, в эффективном обеспечении качественным сырьем доменного производства АО «ЕВРАЗ НТМК». Технологии переработки сырья продолжают непрерывно развиваться [1], поэтому представляют особый интерес те мероприятия, что направлены на получение агломерата с улучшенными металлургическими характеристиками [2–4].

## 2. Химический и фазовый составы титаномагнетитового агломерата

Для исследования выбраны пробы титаномагнетитового агломерата основностью 2,1. Химический состав исследуемых проб агломерата приведен в табл. 1. Обозначение проб следующее: 1 – агломерат текущего производства (агломашина № 1); 2 – агломерат (нижняя часть паллеты, агломашина № 1); 3 – агломерат (средняя часть паллеты, агломашина № 1); 4 – агломерат (верхняя часть паллеты, агломашина № 1).

На рис. 1 приведена характерная дифрактограмма проб агломерата. Основной фазой в агломератах № 1–4 является  $Fe_3O_4$  (магнетит), в меньшем количестве содержится  $Fe_2O_3$  (гематит), а также хорошо проявляется Ca-содержащий силикат сложного состава –  $Ca_{2,3}Mg_{0,8}Al_{1,5}Fe_{8,3}Si_{1,1}O_{20}$ . В небольших количествах содержится  $\gamma$ - $Ca_2SiO_4$  (двухкальциевый силикат). В пробах агломерата основностью 2,1 увеличение нестабилизированной фазы  $\gamma$ - $Ca_2SiO_4$  идет от верха слоя к низу. Так как наличие данной фазы приводит к рассыпанию исходного агломерата, ожидается подобная закономерность при проведении дальнейших опытов по восстановлению и прочности при низкотемпературном восстановлении.



Таблица 1  
Химический состав исследуемых проб агломерата

Проба	Fe <sub>общ</sub> , %	FeO, %	Основность
1	54,18	10,44	2,1
2	54,66	8,13	
3	54,97	8,80	
4	55,87	10,5	
5	54,20	8,95	2,4
6	54,31	8,30	
7	53,82	10,27	
8	53,08	8,38	
9	52,60	8,22	2,4
10	52,70	7,24	
11	53,00	8,42	
12	52,20	10,50	
13	52,60	12,50	
14	52,30	9,67	

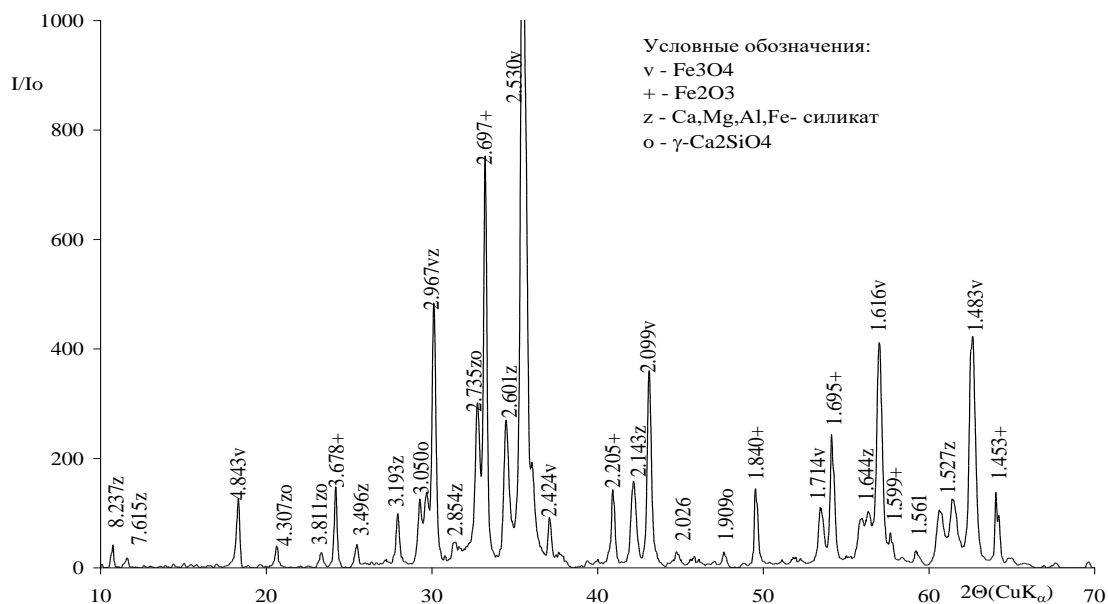


Рис. 1 Дифрактограмма агломерата текущего производства основностью 2,1

### 2.1. Агломерат с повышенной основностью 2,4

Для исследования выбраны пробы титаномагнетитового агломерата с повышенной основностью 2,4. Химический состав агломерата приведен в табл. 1. Обозначение проб следующее: 5 – агломерат (агломашина № 2); 6 – агломерат (нижняя часть паллеты, агломашина № 2); 7 – агломерат (средняя часть паллеты, агломашина № 2); 8 – агломерат (верхняя часть паллеты, агломашина № 2).

На рис. 2 приведена характерная дифрактограмма проб агломерата. Основной фазой в агломератах № 5-8 является Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (магнетит), в меньшем количестве содержится Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (гематит), а также хорошо проявляется Ca-содержащий силикат сложного состава – Ca<sub>2,3</sub>Mg<sub>0,8</sub>Al<sub>1,5</sub>Fe<sub>8,3</sub>Si<sub>1,1</sub>O<sub>20</sub>. В небольших количествах содержится γ-Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (двухкальциевый силикат). В пробах агломерата основностью 2,4 увеличение нестабилизированной фазы γ-Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> идет наоборот от низа слоя к верху.

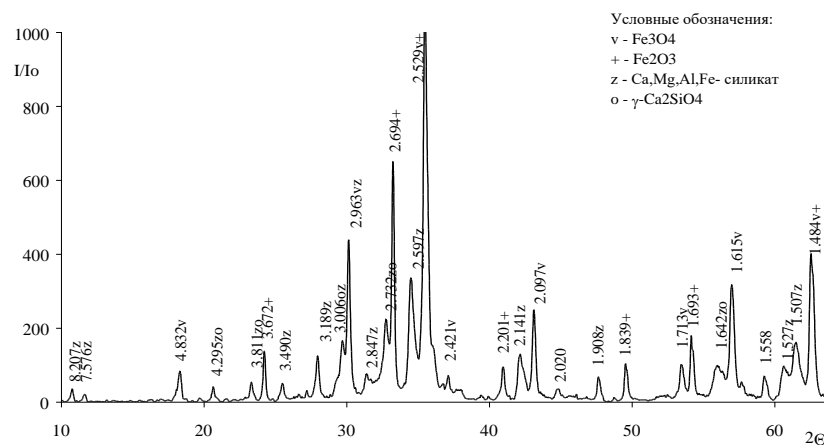


Рис. 2 Дифрактограмма агломерата с повышенной основностью 2,4

### 2.2. Агломерат с добавками связующих полимеров 300 и 500 г/т агломерата

Для исследования выбраны пробы титаномагнетитового агломерата с повышенной основностью 2,4 и добавками связующих полимеров в количестве 300 и 500 г на тонну агломерата. Химический состав агломерата приведен в табл. 1. Обозначение проб следующее: 9 – агломерат с добавкой 300 г/т агломерата (верхняя часть паллеты); 10 – агломерат с добавкой 300 г/т агломерата (средняя часть паллеты); 11 – агломерат с добавкой 300 г/т агломерата (нижняя часть паллеты); 12 – агломерат с добавкой 500 г/т агломерата (верхняя часть паллеты); 13 – агломерат с добавкой 500 г/т агломерата (средняя часть паллеты); 14 – агломерат с добавкой 500 г/т агломерата (нижняя часть паллеты).

В качестве полимерной добавки использовалась специализированная для ГОК линейка добавок серии «Термопласт СВ» компании ООО «Полипласт – УралСиб» [5].

На рис. 3 приведены дифрактограммы исследуемых проб агломерата.

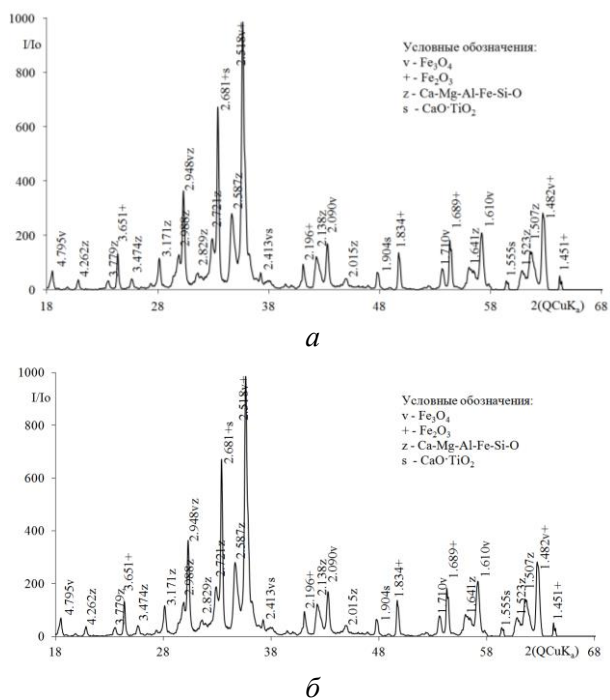


Рис. 3 Дифрактограммы агломерата с повышенной основностью 2,4 и добавками связующих полимеров (а – № 10, б – № 13)

### 3. Metallurgical characteristics of agglomerate

Results of strength tests of agglomerate samples after low-temperature restoration according to ISO 13930, temperature interval of agglomerates according to GOST 26517-85, restorability of agglomerate according to GOST 17212-84 are given in table 2.

In general, for samples selected from the middle and lower layers, the strength of agglomerate (with the addition of 500 g of polymer additive per 1 t of agglomerate) has improved, although with the addition of 300 g of polymer additive per 1 t of agglomerate such an effect was not observed.

Table 2

Results of investigation of metallurgical characteristics of agglomerate

Проба	LTD <sub>+6,3</sub> , %	Восстановимость, %	Температура начала размягчения, °C	Температура конца размягчения, °C	Интервал размягчения, °C
1	6,13	74,70	1180	1300	120
2	8,38	65,80	1200	1300	100
3	8,65	83,20	1220	1290	70
4	1,99	80,70	1240	1360	120
5	13,68	64,70	1140	1280	140
6	10,40	61,80	1200	1320	120
7	14,74	61,70	1260	1340	80
8	7,37	70,20	1210	1330	120
9	22,39	61,70	1200	1320	120
10	22,82	74,03	1160	1210	50
11	22,39	55,86	1120	1170	50
12	22,82	61,87	1260	1340	80
13	40,74	69,63	1170	1250	80
14	39,05	69,59	1130	1190	60

Restoration of agglomerate with polymer additive leads to the formation of metallic iron, wustite (FeO), partially remains magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). On the background of iron-forming phases, silicate phases are formed:  $\beta$ -2CaO·SiO<sub>2</sub> and 2CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>. Also in samples weakly manifested 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

### 4. Results of industrial tests of production and blast furnace smelting of agglomerate with different basicity and polymer additives [6]

In table 3-4 are given some quality indicators of agglomerate and blast furnace smelting of DP No 5, 6 AO «EBRAZ NTMK» for the period April-October 2015. This period can be conditionally divided into stages: April-May – stage 1 or basic (basicity of agglomerate 2,1); June-July – stage 2 (basicity of agglomerate 2,4); August-September – stage 3 (basicity of agglomerate 2,4 with polymer additive); October – stage 4 (basicity of agglomerate 2,4).

Consumption of coke on DP No 5 (kg/t of pig iron) decreased 335,3 in April to 331,3, i.e. by 4,0 kg/t of pig iron (1,2 %), consumption of total fuel (kg/t of pig iron) decreased 483,2 in April to 478,5, i.e. by 4,7 kg/t of pig iron (1,0 %). Consumption of coke on DP No 6 (kg/t of pig iron) decreased 390,5 in April to 386,7, i.e. by 3,8 kg/t of pig iron (1,0 %), consumption of total fuel (kg/t of pig iron) decreased 508,8 in April to 503,3, i.e. by 5,5 kg/t of pig iron (1,1 %).

Metallurgical characteristics of agglomerate changed by stages in the following way (table 5). The greatest influence on strength was the introduction of polymer additive in the amount of 500 g/t of agglomerate. It should be noted that the uneven distribution of the quality indicator by the height of the layer, the lowest value is possessed by agglomerate from the upper layer. Increase in basicity of agglomerate also led to an increase in hot strength, which is confirmed by literature data. In particular, in work [7] the increase in hot strength of agglomerate is explained by an increase in the amount of SFCA phase with increasing basicity.

Таблица 3

Показатели работы ДП № 5 и качество агломерата в 2015 г.

Показатель\месяц	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	335,3	335,7	331,3	332,9	343,8	331,3	345,7
Удельный расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	106,0	105,8	104,0	104,5	107,2	104,9	114,6
Удельный расход ПУТ, кг/т чугуна	73,6	69,4	77,8	78,9	68,4	76,5	56,5
Удельный расход суммарного топлива, кг/т чугуна	483,2	479,2	480,5	483,6	486,0	478,5	482,9
Степень использования СО, %	51,8	51,4	51,9	51	50,3	50,3	50,2
Состав шихты, %: агломерат	38,5	38,7	35,6	39,7	39,4	38,3	39,4
окалыши	53,4	51,2	51,4	52,6	54,1	54,7	55,8
железофлюс	8,1	10,0	12,9	7,7	6,5	7,1	4,8
аглоотсев	101,3	103,5	89,6	100,9	82,5	82,6	88,4
Рассев НТМК, %	16,2	16,3	15,4	15,6	12,8	13,4	13,9
Прочность, % +5 мм, КГОК	74,6	73,8	74,3	74,9	75,8	75,9	76,0

Таблица 4

Показатели работы ДП № 6

Показатель\месяц	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	390,5	384,9	376,3	387,7	383,5	386,7	406,3
Удельный расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	118,4	113,4	102,4	110,4	107,2	118,5	119,5
Удельный расход ПУТ, кг/т чугуна	29,3	30,3	53,3	38,2	40,4	28,2	6,6
Удельный расход суммарного топлива, кг/т чугуна	508,8	500,3	503,6	507,8	502,5	503,3	505,4
Степень использования СО, %	50,1	51,1	50,0	50,7	50,6	50,8	50,8
Состав шихты, %: агломерат	38,1	38,6	37,5	38,8	38,1	38,1	40,7
окалыши	52,1	50,7	52,5	51,7	52,3	51,5	53,9
железофлюс	9,9	10,6	10,1	9,5	9,6	10,3	5,4
аглоотсев	101,6	103,9	94,2	99,5	80,7	83,7	93,0

Следует отметить влияние основности на восстановимость агломерата, однако введение полимерной добавки практически не оказало влияния на восстановимость агломерата, можно лишь отметить ее влияние в количестве 500 г/т агломерата.

Результаты показывают снижение положения зоны когезии вниз по высоте и сужение температурного интервала, что в целом должно положительно сказаться на работе доменной печи. Результаты исследования фазового анализа агломерата показывают на неоднозначную его зависимость от условий обжига.

Таблица 5

Изменение металлургических характеристик агломерата по этапам (усредненные значения по результатам измерений)

Показатель	Этап 1	Этап 2	Этап 3	Этап 4
LTD + 6,3, %	11,01	13,68	12,57	39,9
Восстановимость, %	74,75	64,74	64,90	69,61
Температура начала размягчения, °С	1060	1140	1140	1150
Температура конца размягчения, °С	1200	1280	1190	1220
Температурный интервал, °С	140	140	50	70

### Заключение

Установлено, что восстановимость агломерата основностью 2,4 по сравнению с 2,1 ниже на 10 %, что не противоречит полученным данным LTD: чем ниже восстановимость, тем выше горячая прочность. По LTD агломерат основностью 2,4 демонстрирует более высокие значения по всем трем показателям качества: +6,3, -3,15, -0,5. Температуры начала и конца размягчения агломерата с основностью 2,4 по сравнению с 2,1 увеличились на 80 °С. Интервал размягчения не изменился.

Добавка в агломерационную шихту полимерного связующего в количестве 500 г на тонну оказывает более значительное влияние на качество агломерата, чем добавка 300 г. Прочность агломерата при восстановлении значительно улучшилась по всем трем показателям. Так, LTD<sub>+6,3</sub> составил 39,9 % против 11,01 % в базовом периоде. Следует обратить внимание на неравномерное распределение показателей качества по высоте слоя, наименьшим значением обладает агломерат из верхнего слоя. Восстановимость агломерата с добавкой полимерного связующего в количестве 300 г на тонну и, особенно, в количестве 500 г на тонну, повысилась до 64,9–69,61 %. Этот показатель близок к рекомендуемым для доменного процесса. Результаты определения температур размягчения и плавления для агломерата с полимерными добавками показывают снижение зоны когезии вниз по высоте и сужение температурного интервала, что в целом положительно скажется на работе доменной печи.

*Работа выполнена в рамках выполнения Государственного задания ИМЕТ УрО РАН.*

### Библиографический список

1. Dmitriev A., Petukhov R., Vitkina G. and Vyaznikova E. 2019 *Defect and Diffusion Forum* **391** 215–220.
2. Витькина Г., Дмитриев А. и Алекторов Р. Исследование металлургических характеристик титансодержащего минерального сырья с различным содержанием диоксида титана // *Современные тенденции в области теории и практики добычи и переработки минерального и техногенного сырья* (Екатеринбург: АО «Уралмеханобр»), 2019. – С 401–404.
3. Дмитриев А., Витькина Г., Петухов Р., Петрова С. и Чесноков Ю. 2019 *Бюллетень научно-технической и экономической информации Черная металлургия* **752** – с. 154–166.
4. Dmitriev A., Petukhov R., Vitkina G. and Vyaznikova E. 2019 *Defect and Diffusion Forum* **391** 221–225.
5. Волков Д. Использование полимерного связующего в агломерации / Д. Волков, А. Мамонов, Д. Шатохин, А. Парфенов, И. Кормина // *Наука – Образование – Производство: Опыт и перспективы развития. Т. 1. Горно-металлургическое производство. Машиностроение и металлообработка.* – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. – С. 37–48.
6. Dmitriev A., Vitkina G. and Petukhov R. 2017 *Pure and Applied Chemistry* **8910** 1543–1551.
7. Zhengwei Yu, Guanghui Lu, Tao Jiang, Yuanbo Zhang, Feng Zhou and Zhiwei Peng 2015 *ISIJ International* **554** – P. 907–909.

# РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ НА РАСТЯЖЕНИЕ И ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

**Ерпалов Михаил Викторович,**  
E-Mail: m.v.erpalov@urfu.ru,  
Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Использование образцов с круглой выточкой разных размеров позволяет варьировать показатель напряженного состояния в ходе испытаний образцов на растяжение и, таким образом, расширить возможности применения данного вида испытаний для изучения пластичности металлов и сплавов. Основная трудность при проведении испытаний и обработке результатов экспериментов заключается в необходимости измерения радиуса кривизны шейки и диаметра образца в минимальном сечении, которые используются для расчета значений показателя напряженного состояния согласно моделям Бриджмена, Давиденкова-Спиридоновой или Остсемина. Статья посвящена разработке элементов системы машинного зрения, предназначенной для автоматической фиксации и измерения профиля шейки, которая образуется как на цилиндрических образцах, так и на образцах с радиальной выточкой. Для извлечения контура образца используется видеозапись процесса испытания, полученная с помощью цифровой камеры со сменяемой оптикой, обеспечивающей ручное управление глубиной резко изображаемого пространства. Разработаны алгоритмы фильтрации изображений, выделения контура образца, автоматического поиска границ шейки и аппроксимации ее профиля с помощью специального уравнения. Разработанные алгоритмы реализованы в виде отдельной программы, написанной на языке программирования *Wolfram Language*.

**Ключевые слова.** Испытание на растяжение, пластичность, показатель напряженного состояния, образец, выточка, шейка, радиус кривизны шейки, минимальный диаметр образца в шейке.

## **Введение**

Способность предсказывать момент пластического разрушения материалов является важной при решении практических задач обработки металлов давлением, а также для создания адекватных компьютерных моделей технологических процессов и продукции – цифровых двойников. Величина предельной пластичности материала количественно характеризуется степенью деформации, накопленной к моменту разрушения. На пластичность материала оказывают влияние температура, скорость деформации, внешнее гидростатическое давление, показатель Лоде, а также напряженное состояние металла в очаге деформации. В литературе представлены различные критерии разрушения материалов [1–4], наиболее популярными из которых являются модели Джонсона-Кука и Кокрофта-Латама. Несмотря на влияние многих факторов, величину предельной пластичности материалов оценивают обычно в ходе простых испытаний, предусматривающих однородное распределение напряжений и деформаций во всем образце и постоянное значение показателя напряженного состояния. К таким испытаниям в частности относится растяжение цилиндрических образцов. Однако после локализации деформации в шейке напряженное состояние металла становится трехосным и его необходимо учитывать для повышения точности идентификации моделей разрушения.

Недостатком испытания цилиндрических образцов на растяжения является невозможность изменять показатель напряженного состояния в широком диапазоне значений, в то время как для большинства производственных процессов он существенно отличается. Например, при прессовании преобладают сжимающие напряжения, а при волочении – растягивающие. Численно показатель напряженного состояния можно

оценить величиной

$$\eta = \frac{\sigma}{\sigma_{\text{экв}}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – среднее нормальное напряжение,  $\sigma_{\text{экв}}$  – эквивалентное напряжение Мизеса. Использование образцов с различной выточкой при изучении пластичности материалов позволяет расширить диапазон значений показателя напряженного состояния [5–6]. Однако его изменение в ходе испытаний на растяжение также необходимо учитывать для повышения точности идентификации моделей разрушения.

В работе [6] Бриджмен показал связь между показателем напряженного состояния в центре шейки и геометрией образца:

$$\eta = \frac{1}{3} + \ln\left(1 + \frac{d}{4R}\right), \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр образца в минимальном сечении шейки,  $R$  – радиус кривизны шейки в этом же сечении. Наряду с теорией Бриджмена, в литературе представлены другие модели распределения напряжений в шейке [7]. Однако они также полагают, что показатель напряженного состояния определяется геометрией шейки. Таким образом, необходимость учета показателя напряженного состояния при идентификации моделей разрушения материалов ставит задачу измерения профиля шейки образца, в т. ч. образца с выточкой, непрерывно в процессе испытания.

В работах [5, 8, 9] предложены методы обработки результатов испытаний образцов на растяжение, использующие экспериментальное измерение профиля шейки. В работе [8] Дж’Шелл и др. применили испытательную систему на растяжение, снабженную компьютерным экстензометром и контроллером истинной скорости деформации. Для анализа профиля шейки эта система использовала кадры размером 512×512 пикселей. В работе [5] Санчо и др. использовали цифровую зеркальную фотокамеру и алгоритм автоматической обработки изображений для извлечения контуров шейки. С целью повышения контрастности изображений авторы применяли дополнительное освещение образца, окрашенного в белый цвет. В работе [9] они предложили улучшенную методику испытания, когда освещение было расположено позади образца, при этом съемка осуществлялась на высокоскоростную видеокамеру.

В этой работе предлагается собственный подход к компьютерному измерению профиля шейки при испытании цилиндрических образцов, а также образцов с выточкой с целью определения диаметра в минимальном сечении шейки и радиуса ее кривизны.

#### **Аналитическое описание профиля шейки при испытании образцов с выточкой**

Выбор аналитического выражения для описания функциональной зависимости радиальной координаты точек на поверхности образца  $\rho$  от соответствующей осевой координаты  $z$  является важным этапом при разработке компьютерной системы, направленной на построение диаграмм предельной пластичности. Наличие формулы, описывающей профиль шейки, позволяет рассчитывать радиус ее кривизны в минимальном сечении образца аналитически:

$$R = \frac{\left[1 + (\rho'(z_0))^2\right]^{\frac{3}{2}}}{|\rho''(z_0)|}, \quad (3)$$

где  $\rho'(z_0)$  и  $\rho''(z_0)$  – первая и вторая производные уравнения профиля шейки соответственно,  $z_0 = 0$  – осевая координата минимального сечения образца.

Для аппроксимации поверхности шейки может быть использован полином второго или высшего порядка. Однако в данной работе предлагается использовать специальный вид уравнения, который, как показано в работе [10], достаточно хорошо описывает профиль цилиндрического образца с шейкой на всей расчетной длине:

$$\rho = \frac{d_1}{2} - \frac{d_1 - d}{2} \cdot \left(1 + \frac{z^2}{c}\right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $\rho$  и  $z$  – радиальная и осевая координаты точек на поверхности образца соответственно,  $c$  – параметр в уравнении, чувствительный к свойствам материала,  $d$  минимальный диаметр образца в шейке,  $d_1$  – диаметр рабочей части образца в начальный момент формирования шейки. Уравнение (4) не позволяет аппроксимировать всю поверхность образца с выточкой, в наименьшем сечении которой формируется шейка. Однако график уравнения (4) имеет ровно две точки перегиба, между которыми аппроксимация шейки предложенным уравнением осуществляется с высокой точностью.

Для оценки точности аппроксимации профиля шейки в работе было выполнено компьютерное моделирование в программе Deform-2D. Исследовали формоизменение шейки на стандартных 5-кратных образцах (ГОСТ 1497), а также образцах, имеющих радиальную выточку согласно рис. 1. Размеры образцов приведены в табл. 1.

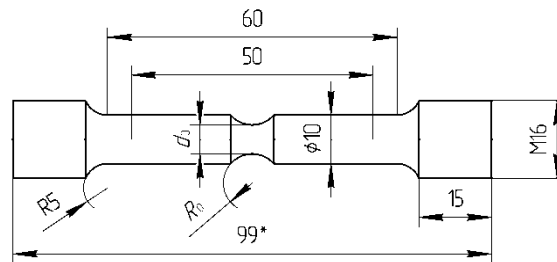


Рис.1 Геометрия образцов с выточкой

Таблица 1  
Характеристики исследуемых образцов

Номер образца	Характеристика образца	Острота выточки, $(d/R)_0$	Радиус кривизны, $R_0$ (mm)	Минимальный диаметр, $d_0$ (mm)	Показатель Напряженного состояния, $\eta_0$
1	Гладкий образец	0	$\infty$	6	0,333
2	Образец с выточкой	0,5	12		0,451
3		1	6		0,556
4		2	3		0,739

На рис. 2 представлены графики уравнения аппроксимации (4) (они показаны сплошными линиями) в сравнении с соответствующим фактическим профилем шейки (показаны точками), найденным в ходе компьютерного моделирования. При аппроксимации профиля шейки была задействована лишь часть точек на поверхности образца (показаны точками большего размера).

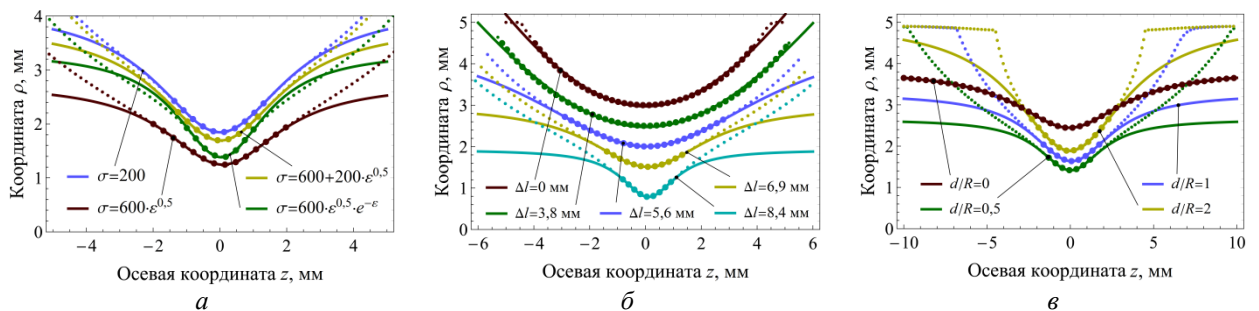


Рис. 2 Аппроксимация профиля шейки уравнением (4) по результатам компьютерного моделирования в зависимости от: а – кривой упрочнения материала (образец 3); б – стадии испытания (образец 3,  $\sigma = 600 \cdot \epsilon^{0.5}$ ); в – остроты выточки ( $\sigma = 600 \cdot \epsilon^{0.5}$ )



Результаты компьютерного моделирования показали, что высокая точность аппроксимации профиля шейки достигается между точками перегиба во всех случаях, а именно при использовании материалов с различной кривой упрочнения (рис. 2), на любой стадии испытания образцов (рис. 3), а также при использовании образцов с разной остротой выточки (рис. 4). Кривые упрочнения тесовых материалов приведены на рис. 2. Точность аппроксимации оценивалась как максимальное значение разности радиальной координаты точек на поверхности образца и соответствующего расчетного значения согласно уравнению (4). По данным рис. 2 величина ошибки составила не более 0,018 мм; по данным рис. 3 – 0,11 мм; по данным рис. 4 – 0,05 мм. Максимальное отклонение расчетного профиля шейки от результатов компьютерного моделирования характерно лишь для начальной стадии испытания образцов с выточкой, когда шейка еще не выражена достаточно заметно. Тем не менее, величина этой ошибки достаточно мала и не превышает 4 % от минимального диаметра образца в шейке.

### **Система машинного зрения для автоматического измерения шейки**

Системы машинного или компьютерного зрения в настоящее время используются для решения самых разнообразных практических задач [11], например, оптическое распознавание символов, автоматический контроль, обеспечение безопасности автотранспорта, распознавание отпечатков пальцев, лица и т. д. Автоматическое распознавание контуров и границ объектов является одной из таких задач.

Применение систем оптического измерения является хорошим решением для получения данных о размерах шейки в процессе испытания по ряду причин. Во-первых, результаты измерения шейки могут быть получены без необходимости извлечения образца из захватов испытательной установки. Во-вторых, точность и количество измерений определяются теми алгоритмами получения и обработки изображений, которые заложены в систему компьютерного зрения. А влияние человеческого фактора на точность получаемых данных практически исключается. Наконец, существенно возрастает скорость обработки данных и получения конечного результата.

В данной работе разработана система оптического измерения профиля шейки в т. ч. на образцах с выточкой. Для получения координат точек, соответствующих поверхности образца в работе используется цифровая зеркальная фотокамера *Canon 700D*. В случае испытания образцов с выточкой, когда изменение размеров шейки происходит быстро, процесс испытания целесообразно записывать в видеофайл. Извлечение отдельных кадров из видеофайла осуществляется с помощью программы *FFmpeg*. Для автоматической обработки большого количества отдельных изображений написана специализированная программа на языке *Wolfram Language*.

Извлечение контура шейки состоит из нескольких этапов. На первом этапе задается область кадра, в которой расположен образец с шейкой. На втором этапе осуществляется поиск оси образца и поворот изображения таким образом, чтобы ось образца совпала с вертикалью. На третьем этапе применяется фильтр для отделения образца от фона. Затем осуществляется извлечение контура шейки и производится обработка данных.

Одним из наиболее сложных, с точки зрения программной реализации, является алгоритм фильтрации, позволяющей отделить образец от окружающего фона. Для повышения контрастности образца используется цветной фон. В программе предусмотрены различные варианты фона – общепринятый зеленый, синий, красный, черный или белый. В последних двух случаях съемка процесса испытания может осуществляться аналогично работам [5] и [9], когда применяется окрашивание образца или контрольное освещение соответственно. Настройка фильтра (рис. 3) осуществляется несколькими манипуляторами, устанавливающими уровни освещенности фона или образца по каждому цветовому каналу отдельно или вместе (*grayscale mode*) в зависимости от выбора пользователя.

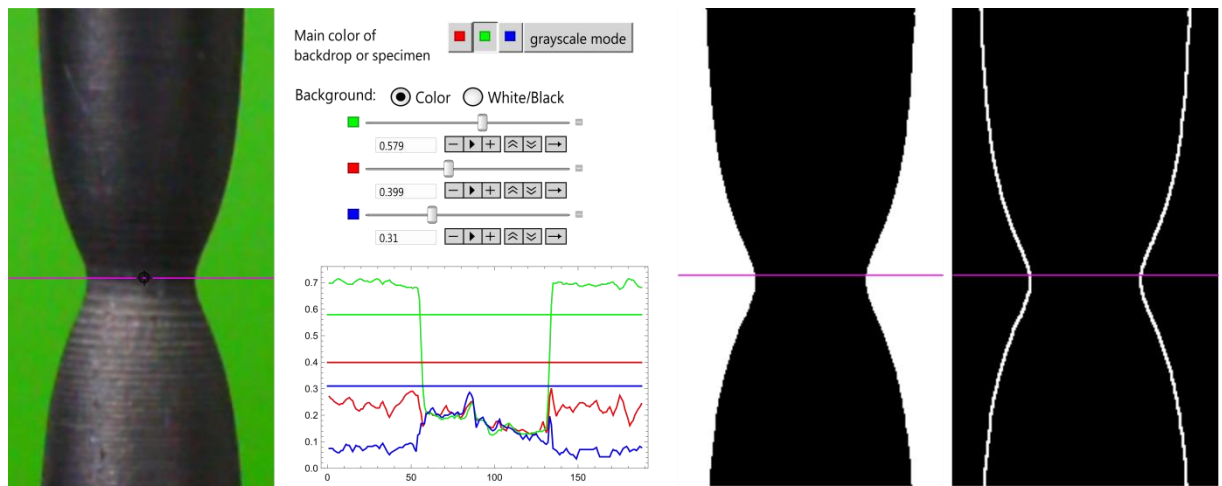


Рис. 3 Настройка фильтра для отделения образца от окружающего фона

После бинаризации изображения с удаленным фоном оно подвергается обработке градиентным фильтром для выделения контура образца. В работе рассмотрена возможность применения градиентных фильтров Превитта, Собеля и Щара, отличающихся коэффициентами маски для цифровой свертки изображений. Установлено, что фильтр Собеля обеспечивает наиболее точный результат. Кроме того, сверточная маска размерностью  $3 \times 3$  пикселя обеспечивает окрашивание в белый цвет двух пикселей, расположенных относительно действительной границы образца с разных сторон. Один пиксель расположен со стороны образца, а другой – со стороны фона. В этом случае аппроксимация профиля шейки с использованием метода наименьших квадратов и предложенного уравнения осуществляется таким образом, что расчетная кривая расположена между указанными белыми пикселями, т. е. наиболее близко к действительной границе образца. Данный подход является альтернативой субпиксельной коррекции границ образца, предложенной в работе [9].

По результатам компьютерного моделирования испытания на растяжение образцов с радиальной выточкой был сделан вывод о том, что для достижения наибольшей точности аппроксимации профиля шейки следует использовать только те точки на поверхности образца, которые расположены между ближайшими точками перегиба. Наличие только двух точек перегиба у графика уравнения (4) делает возможным осуществлять автоматический итерационный поиск границ шейки. Здесь под границами шейки понимается диапазон точек на поверхности образца, используемых для поиска уравнения аппроксимации. Для этого необходимо минимизировать разность между осевыми координатами границ образца и координатами точек перегиба:

$$z_{max} - \left(\frac{c}{3}\right)^{1/2} \rightarrow \min. \quad (5)$$

На рис. 4 показан пример итерационной процедуры поиска границ шейки образца с радиальной выточкой.

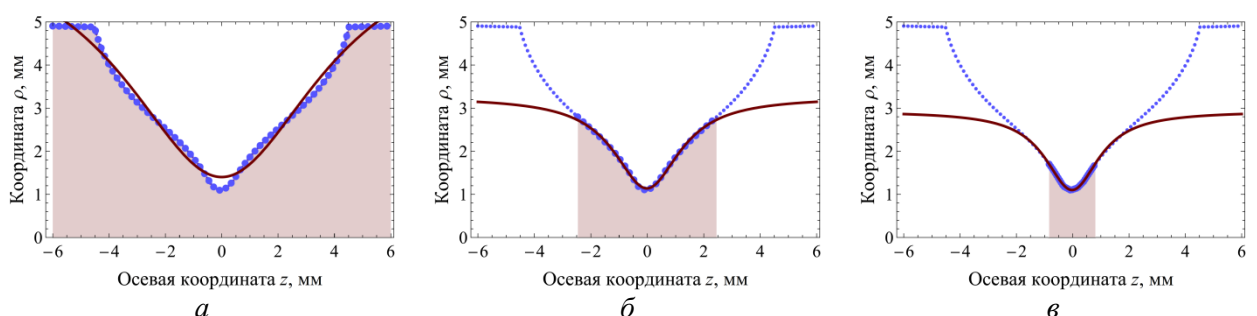


Рис. 4 Автоматический поиск границ шейки на основе координат точек перегиба:  
*a* – первая итерация; *б* – вторая итерация; *в* – третья итерация

В данной работе для измерения профиля шейки в первой итерации используется вся поверхность той части образца, которая указана в качестве интересующей области кадра на первом этапе обработки результатов испытаний. Найденное значение параметра  $s$ , входящее в уравнение (4) позволяет рассчитать координаты точек перегиба и сравнить их с границами шейки. Для последующих итераций из всего массива точек на поверхности образца выбираются только те, которые находятся между расчетными точками перегиба. Процедура повторяется до тех пор, пока границы шейки, находящейся в выточке образца, не совпадут с точками перегиба с заданной точностью.

### **Заключение**

Для непрерывного измерения диаметра образца в минимальном сечении шейки, а также радиуса ее кривизны в процессе испытания на растяжение предложена система, позволяющая осуществлять видеофиксацию испытания и обрабатывать полученные результаты в автоматическом режиме. Измерение профиля шейки основано на аппроксимации экспериментальных данных с помощью специального уравнения. Исследование показало высокую эффективность предложенного уравнения как с точки зрения воспроизведения профиля шейки, так и с точки зрения автоматизации поиска ее границ, расположенной внутри радиальной выточки образца. Для автоматизации обработки видеозаписей и результатов испытаний образцов на растяжение написана программа на языке *Wolfram Language*.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых-кандидатов наук МК-1878.2020.8.*

### **Библиографический список**

1. Cockcroft M. G., Latham D. J. Ductility and the workability of metals // J. Inst. Metals. – 1968. – Vol. 96. – P. 33–39.
2. Mecking H., Kocks U. Kinetics of flow and strain-hardening // Acta Metall. – 1981. – Vol. 29. – P. 1865–1875.
3. Johnson G. R., Cook W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strain, strain rates, temperatures, pressures // Eng. Fract. Mech. – 1985. – Vol. 21. – P. 31–48.
4. Bai Y., Wierzbicki T. A new model of metal plasticity and fracture with pressure and Lode dependence // Int. J. Plasticity. – 2008. – Vol. 24. – P. 1071–1096.
5. Sancho A. [et al.] An experimental methodology to characterize post-necking behavior and quantify ductile damage accumulation in isotropic materials // J. Solids Struct. – 2019. – Vol. 176–177. – P. 191–206.
6. Bridgman P. W. Studies in Large Plastic Flow and Fracture, with Special Emphasis on the Effect of Hydrostatic Pressure. – New York: McGraw-Hill. – 1952. – 362 p.
7. Davidenkov N.N., Spiridonova N.I. The analysis of the state of stress in the neck of tension specimen // Proc. ASTM. – 1946. – Vol. 46. – P. 1147–1159.
8. G'Sell C. [et al.] Video-controlled tensile testing of polymers and metals beyond the necking point // J. Mater. Sci. – 1992. – Vol. 27. – P. 5031–5039.
9. Sancho A. [et al.] Experimental methodology for the measurement of plasticity on metals at high strain-rates // EPJ Web Conf. – 2018. – Vol. 183. – P. 02063.
10. Erpalov M., Nukhov D. The Influence of Hardening Curve on the Shape and Size of the Neck of Specimen in Tensile Test // Mater. Sci. Forum. – 2020. – Vol. 989. – P. 372–377.
11. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. – London: Springer. – 2010. – 812 p.

## МИНЕРАЛЬНАЯ СЫРЬЕВАЯ БАЗА (МСБ) МАРГАНЦА РОССИИ И ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Журавлев Александр Александрович,  
Малыгин Александр Викторович,  
E-Mail: [mzhs@urfu.ru](mailto:mzhs@urfu.ru),  
Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** В данной работе рассматривается ситуация с производством марганцевых сплавов на основе сырьевой базы, имеющейся в стране. Марганец – стратегический металл, используемый для выплавки сталей различных типов и как легирующий элемент и как раскислитель. В то же время существует определенный дефицит данного металла, в связи с чем, необходима организация добычи и переработка отечественного марганцевого сырья в РФ, в т. ч. с учетом обеспечения ресурсной безопасности страны.

**Ключевые слова.** Минерально-сырьевая база, сплавы, производство, марганец, руда, запасы, объем рынка, ферросплавы.

Черная металлургия России в последние годы наращивает объемы производства и за период с 1995 по 2019 гг. выплавка стали выросла с 51,6 до 71,68 млн. т в год. Рост производства стали и ее качества, тесно связан с динамикой производства ферросплавов. Среди общего объема производимых ферросплавов на рынке России нужно выделить ферросилиций с долей в общем объеме производства 49,39 %, ферросиликомарганец – 16,13 %, феррохром – 13,92 %, ферромарганец – 9,65 % (см. диаграмму 1). Особую озабоченность вызывает производство марганцевых сплавов.

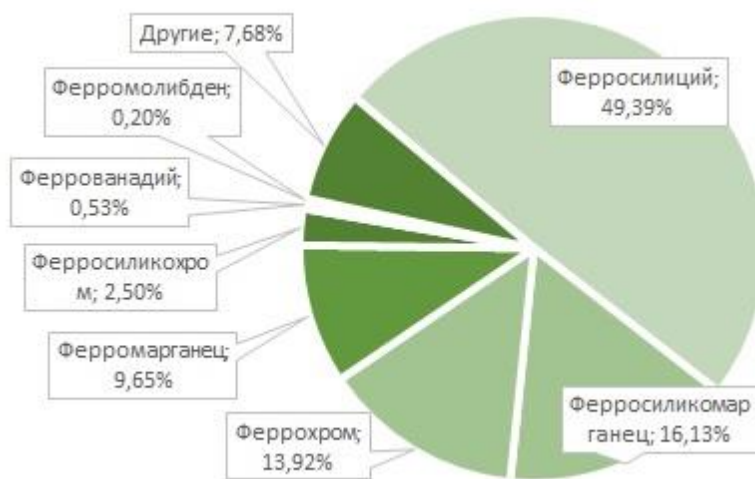


Рис. 1 Доли производства ферросплавов в РФ в январе-феврале 2018 г., %; [1]

Марганцевые руды являются стратегическим продуктом, т. к. марганец в готовой стали является полезной примесью, служащей для повышения служебных свойств сталей, раскисления и легирования. У нас получают всего 66 тыс. т руды при потребности ферросплавных заводов до 1020 тыс. т/год [3–4]. Из-за нехватки марганцевой руды сырье поступает к нам из Казахстана, ЮАР и в малых объемах – из Болгарии и Габона. Месторождения марганцевых руд, имеющиеся в России, не содержат значительных запасов, которые могли бы обеспечить добычу марганцевых руд на 40–50 лет. Государственным балансом России [5] учтены 29 месторождений с запасами на начало 2018 г. кат. А + D + С<sub>1</sub> – 137,8 млн. т, кат. С<sub>2</sub> – 92,4 млн. т [6]. Балансовые руды представлены – оксидными,

окисными, смешанными и карбонатными. Около 80 % балансовых руд составляют карбонатные руды. Все руды имеют относительно низкое содержание марганца, особенно – карбонатные и карбонатно-силикатные. При этом отечественные Mn-руды содержат от 0,2 до 0,8 % фосфора, а также повышенное количество железа и двуокиси кремния [7]. В ресурсах РФ имеется новый вид перспективного Mn-сырья. Это конкреции [8, 12], расположенные в акватории Финского залива Балтийского моря, суммарный запас которых составляет около 1 % запаса марганцевых руд. Причем залегают они на глубине 30–70 м. Большая часть марганца (17–25 %) находится в конкрециях диаметром более 5 мм, в конкрециях меньшего размера содержание марганца снижается до (5–8 %). Авторы [9] работы считают, что наиболее рационально обогащать этот вид сырья дитионатным способом [9], позволяющим получать концентрат с высоким содержанием марганца (55–62 %) и, что особенно важно, с низким содержанием фосфора (0,01–0,017 %). В РФ имеется много мелких месторождений разбросанных от Урала и до Восточной Сибири, и на данный момент ни одно месторождение до конца не освоено. Объемы производства на рынке ферромарганца в России в 2017 г. имели положительный тренд [2]. По расчетам *DISCOVERY Research Group* объем рынка ферромарганца в России в 2016 г. составил 149 222 т, а в 2017 г. он вырос на 17,8 % и составил 175 802 т. В январе 2017 г. его производство составило 14 тыс. т, к декабрю 2017 г. оно увеличилось на 24,1 % до 17 тыс. т. В стоимостном выражении объем рынка в 2016 г. составил 120 920 \$ тыс. В 2017 г. он увеличился на 42,3 %. Согласно оптимальному прогнозу *DISCOVERY Research Group*, объем рынка ферромарганца в стоимостном выражении к 2020 г. составит 299 164,4 тыс. \$. В натуральном выражении объем рынка ферромарганца в 2020 г. составит 279055,1 т.

Мировые запасы марганцевых руд оцениваются в 18 млрд. т, в т. ч. на территории государств – членов СНГ в 3,1 млрд. т или 17 % мировых запасов. Разведанные мировые запасы марганцевых руд промышленного значения на начало 90-х гг. оцениваются в 5 млрд. т. Ресурсы марганцевого сырья в мире расположены неравномерно. Примерно 85 % запасов марганцевых руд сосредоточено в 13 странах Африки. В странах СНГ 12–13 % мировых запасов марганца. На данном этапе развития черной металлургии свыше 88 % мирового производства товарных марганцевых руд обеспечивают всего семь стран, структура добычи в которых распределяется следующим образом, (%): КНР – 21,6; ЮАР – 15,0; Украина – 14,0; Бразилия – 10,1; Австралия – 9,7; Габон – 9,2; Индия – 7,8; прочие – 12,6. Промышленно-развитые страны ЕЭС и Северной Америки не располагают собственной МСБ марганца, поэтому для обеспечения черной и цветной металлургии марганцем они экспортируют руду из ЮАР, Австралии, Бразилии, Индии, Заира [10–11].

После распада СССР металлургический комплекс России остался без источников марганцевых руд и вынужден импортировать руду для выплавки марганцевых ферросплавов. Каковы перспективы снабжения марганцевыми рудами металлургического комплекса России? По данным работы [11] на территории России сосредоточено 6,1 % от разведанных и изученных запасов марганцевых руд СССР, на Украине 82,4 %, в Грузии 8,9 %, в Казахстане 2,6 %. Основные запасы марганцевых руд сосредоточены в 11 месторождениях (табл. 1), принятых на балансовый учет. На данном этапе развития металлургического комплекса ни одно из месторождений не эксплуатируется в полном объеме [10–11]. В настоящее время добыча марганцевой руды ведется на Никольском месторождении в Иркутской области (1,5 тыс. т/год), Парнокском – в республике Коми (1,5 тыс. т/год), Громовском – в Читинской области (52,2 тыс. т/год). Основным недостатком минерально-сырьевой базы (МСБ) марганца является низкое качество руды, поэтому к промышленным могут быть отнесены только руды, для которых разработана технология обогащения (10 % всех запасов).

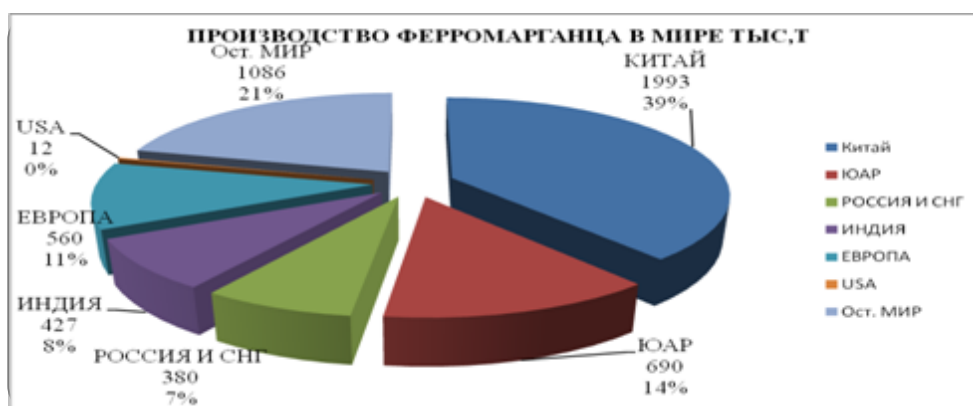


Таблица 1

Запасы и прогнозные ресурсы марганцевых руд (млн. т) России [6, 11]

№	Регионы	Общие запасы	Прогнозные ресурсы
1	2	3	4
1	Свердловская область	41,7	110,0
2	Республика Коми	24,8	53,0
3	Красноярский край	88,9	275,5
4	Хабаровский край, ЕАО	154,2	125,0
5	Читинская область	1,0	500,0
6	Иркутская область	2,1	293,0
7	Кемеровская область	132,2	17,5
8	Алтайский край	1,0	20,0
9	Башкортостан	11,3	72,1
10	Оренбургская область	1,6	6,0
11	Полярный Урал	–	576,0
	<b>Итого:</b>	<b>319,8*</b>	<b>2048,1</b>

\* Кроме того, марганцовистые известняки – 260 млн т.

Данные табл. 1 получены на основании поисковых работ, предварительной разведки и только в отдельных районах использовали детальную разведку. В основном геологические и геофизические работы проведены в довоенный период и в период войны. Возобновившиеся в последнее время работы позволили получить дополнительные сведения об этих месторождениях. На большинстве месторождений марганцевых руд с участием Министерства природных ресурсов и региональных геологических комитетов продолжались геологоразведочные работы для получения необходимых геологических данных в перспективных марганцево-рудных провинциях для составления технических проектов строительства горнодобывающих предприятий.

Для России необходимо вновь создавать МСБ марганца, мощности для производства сплавов марганца различного состава и назначения или вкладывать средства в развитие марганцево-рудной базы стран СНГ, оставаясь в полной зависимости от политических, экономических и прочих обстоятельств, складывающихся во взаимоотношениях с бывшими республиками СССР. Либо развивать собственную сырьевую базу по марганцу и производство на ее основе марганцевых сплавов различного состава и назначения.

Обеспечение марганцевым сырьем черной металлургии России осуществляется в настоящее время практически за счет импорта. Освоение месторождений марганцевых руд в Свердловской, Оренбургской, Кемеровской областях, Красноярском крае, Республике Башкортостан и других позволит снизить дефицит, а в дальнейшем и удовлетворит потребность ферросплавных заводов России. Одна из основных задач геологической службы России – развитие работ по выявлению новых богатых месторождений марганца и создание эффективных методов технологической переработки руд. Известно, что низким спросом для инвестирования и получения лицензии на право

добычи пользуются месторождения марганцевых руд, угля, титана, ртути, тантала, ниобия и других минералов и поэтому без государственной поддержки ввод необходимых мощностей по добыче марганцевых руд вряд ли в ближайшее десятилетие осуществим. С целью ускорения создания МСБ марганца в России ОАО «Российский марганец» разработал программу развития сырьевой базы марганца и на ее основе производство марганцевых ферросплавов. Разработанная программа включает 5 разделов.

С целью обеспечения Российских предприятий черной металлургии углеродистым ферромарганцем необходимо оценить его потребность для сталеплавильного сектора на период 2025–2030 гг. В России перспективная потребность промышленности в марганцевых сплавах впервые оценена сотрудниками ЦНИИЧМ в 1995 г. Согласно прогнозу на 2010 г. она составила более 600 тыс. т (табл. 2).

Таблица 2

Расчетная потребность России в марганцевых ферросплавах

Выплавляемая сталь	Объем производства стали, (млн. т/год)			Удельный расход ферросплавов, кг/т стали	Потребность в марганцевых ферросплавах, (тыс. т/год)		
	2000	2005	2010		2000	2005	2010
Углеродистая	48,0	52,0	56,0	8,0	384,0	416,0	448,0
Легированная	12,0	13,0	14,0	14,0	168,0	182,0	196
Итого:	60,0	65,0	70,0	22,0	552,0	598,0	644,0

Для производства 600–650 тыс. т в год ферромарганца примерная потребность в марганцевой руде должна составлять 3,5–4,5 млн т товарной руды.

С учетом роста производства стали в 2019 г., по сравнению с расчетным периодом 2010 г., для производства 660–750 тыс. т в год ферромарганца в 2020–2021 гг. примерная потребность в марганцевой руде составит 3,85–4,9 млн. т товарной руды.

#### Библиографический список

1. База данных Росстата. Электронный ресурс. Режим доступа: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/oxrana/tab1/oxr\\_otxod1.htm](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/oxrana/tab1/oxr_otxod1.htm).
2. Рынок ферросплавов в 2017-2018: производство в России. MetalResearch. Металлургические исследования. URL:// [http://www.metalresearch.ru/ferralloys\\_market\\_2017-2018.html](http://www.metalresearch.ru/ferralloys_market_2017-2018.html).
3. Леонтьев Л. И. Состояние и перспективы производства ферросплавов в РФ / Л. И. Леонтьев, Л. А. Смирнов, В. И. Жучков // Металлург. – 2015. – № 11. – С. 11–15.
4. Боярко Г. Ю. Товарные потоки ферросплавов в России / Г. Ю. Боярко, В. Ю. Хатьков // Черные металлы. – 2018. – № 3. – С. 60–63.
5. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016–2017 гг.». – Москва : ВИМС, 2018. – 370 с.
6. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2013 г» Марганцевые руды. – Москва : ООО «Минерал-Инфо», 2014. – С. 137–142.
7. Дашевский В. Я. Марганец Российской Федерации / В. Я. Дашевский, В. И. Жучков, Л. И. Леонтьев // Труды науч.-практ. конференции «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» «НИОКР-2018». – Екатеринбург, 2018. – С. 56–66.
8. Дашевский В. Я. Железомарганцовистые конкреции Финского залива – перспективное сырье для производства ферросплавов / В. Я. Дашевский // Ресурсы, технологии, экономика. – 2004. – № 5. – С. 15–19.

9. Безъязыков Б. Н. Исследование и разработка дитионатного процесса переработки бедных марганцевых продуктов: автореф. дисс. канд.тех.наук. – Кривой Рог : Механобрчермет, 1971. – 23 с.

10. Лупова И. А. Разработка и оптимизация режима спекания под давлением марганецсодержащих ферритно-кальциевых материалов : дисс. на соиск. канд. тех. наук. Липецк, 2009. – 183 с.

11. Машковцев Г. А. Минерально-сырьевое обеспечение ферросплавного производства России / Г. А. Машковцев // Труды науч.-практ. конференции «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» «НИОКР-2018». Екатеринбург, 2018. – С. 30–35.

12. Минеральные ресурсы Мирового океана: концепция изучения и освоения (на период до 2020 г.). – Санкт-Петербург : ВНИИ Океанология, 2007. – 97 с.

## ПОЛУЧЕНИЕ НИОБИЙСОДЕРЖАЩИХ ФЕРРОСПЛАВОВ ИЗ РОССИЙСКОГО РУДНОГО СЫРЬЯ

Жучков Владимир Иванович,  
Заякин Олег Вадимович,  
E-Mail: zferro@mail.ru,  
Михайлова Людмила Юрьевна,  
E-Mail: ferrostal@bk.ru,  
Институт металлургии УрО РАН,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Изучена возможность переработки ниобийсодержащих пироклор-апатитовых концентратов, полученных из руд Белозиминского месторождения. Предложена двухстадийная схема селективного восстановления фосфора в металлическую фазу с получением низкофосфористого ниобийсодержащего шлака. Восстановление фосфора и железа проводили карботермическим методом с использованием в качестве восстановителя углерода кокса и чугуна, в качестве осадителя – чугунон стружки и магнетитового продукта (80 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). В лабораторных и полупромышленных условиях показана принципиальная возможность селективного отделения и осаждения фосфора (до 91 %) и железа из ниобиевого концентрата без значительного восстановления ниобия (до 1–2 %) по двухстадийной схеме с минимально возможной температурой процесса в первый период (~1260 °С) и выдержкой при повышенной температуре (~1450 °С) – во второй период. Полученный низкофосфористый ниобийсодержащий шлак после дробления может быть использован для производства феррониобия по существующим технологическим схемам.

**Ключевые слова.** Металлургия, ниобиевый концентрат, карботермический метод, селективное восстановление фосфора, низкофосфористый ниобийсодержащий шлак, феррониобий.

### Введение

Среди главных проблем ферросплавного производства России все большее значение приобретает обеспеченность рудным сырьем. Это связано с ухудшением качества и снижением запасов рудного сырья при увеличении спроса на ферросплавы высоких кондиций. Только немногие виды сплавов выпускаются на отечественных заводах из собственного сырья, а основное их количество либо завозится из-за рубежа, либо выплавляется у нас из импортного сырья [1–3].



Одним из наиболее стратегически важных элементов металлургического производства является ниобий [4–6]. Потребление феррониобия российскими сталеплавильщиками увеличилось с 200–300 т/год в конце 90-х гг. прошлого столетия до 4–6,5 тыс. т /год в настоящее время. Однако его собственное производство в РФ составляет всего ~ 200 т/год из-за отсутствия современных технологических решений по переработке сырья из имеющихся в наличии отечественных ниобиевых месторождений [7, 8].

В РФ разведан крупный район месторождений ниобия (Белозиминское, Большетагнинское, Зашихинское и др.), в Читинской обл. – Катугинское, в Красноярском крае – Татарское, Чуктугонское и др. Все месторождения отличаются друг от друга вещественным составом, в который входят пирохлор, апатит, монацит, вермикулит и другие минералы [8].

По данным [8] перспективные промышленные источники этого сырья можно разделить на три группы.

1. Объекты ускоренного освоения. К ним относятся: Татарское месторождение (Красноярский край), представленное промышленными минералами – пирохлором, апатитом и вермикулитом; Салланлатва (Мурманская обл.), минералы – луешит, барит.

2. Объекты комплексного промышленного освоения с попутным пирохлором. Это Катугинское месторождение (Читинская обл.), минералы: гагаринит, пирохлор, колумбит, циркон, криолит.

3. Объекты суперкрупные и крупные с ведущей пирохлоровой специализацией и природнолегированными Fe-Nb рудами. К ним относятся месторождения: Томторское (Саха-Якутия), пирохлор, монацит, крандаллит и др.; Большетагнинское (Иркутская обл.), пирохлор, апатит; Белозиминское (Иркутская обл.), пирохлор, апатит, колумбит, монацит.

Содержание  $Nb_2O_3$  в рудах колеблется от 0,1 до 1 %, в них имеются также разные количества фосфора, тория и других элементов.

При обогащении руд этих месторождений получают концентраты разного состава, содержание  $Nb_2O_3$  в них колеблется от 15–25 до 40–50 %, фосфора до 10–15 % [9].

В связи с этим возникают сложные задачи по разработке для каждого вида российского рудного сырья эффективных процессов получения ниобиевых ферросплавов приемлемого для сталеплавильщиков состава.

В работах [10, 11] рассматривается технология выплавки феррониобия и ниобийсодержащих сплавов из концентратов руд Большетагнинского месторождения. Для переработки чистого пентаоксида ниобия предложена внепечная алюминотермическая плавка. Для переработки предварительно обесфосфоренных концентратов предложена одностадийная электропечная алюминотермическая плавка. Для переработки концентратов с большим содержанием фосфора предложена двустадийная схема. На первой стадии проводится дефосфорация путем перевода фосфора в попутный металл и получения малофосфористого ниобийсодержащего шлака. На второй стадии из малофосфористого ниобийсодержащего шлака получают ниобийсодержащий сплав.

#### **Экспериментальная часть**

В ИМЕТ УрО РАН изучена возможность переработки пирохлор-apatитовых концентратов, полученных из руд Белозиминского месторождения. Схема обогащения этих руд предусматривает получение черного и кондиционного концентратов.

Задачей исследований была разработка физико-химических основ и технологии процесса получения ниобиевых ферросплавов рационального состава с глубокой дефосфорацией.

На основании проведенных исследований был сделан вывод о том, что для получения комплексных ниобийсодержащих сплавов с глубокой дефосфорацией можно применять пироселекцию с использованием трех основных методов восстановления: карбо-, алюмини- и силикотермию.

Дефосфорацию концентратов руд Белозиминского месторождения проводили методом пироселекции.

Изучение процесса проводили с кондиционным белозиминским концентратом (табл. 1) [12].

Таблица 1  
Состав ниобиевого концентрата, %

Материал	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
Концентрат кондиционный	47,1	1,2	8,8	1,5	15,8	0,2	1,2	5,1

Состав шихтовых материалов приведен в табл. 2.

Крупность шихтовых материалов, мм: концентрат кондиционный – 0,3–1,2; кокс – до 3; ферросилиций, силикоалюминий и алюминий – 0,5–2; чугунная стружка – 0,2–0,4; известь, кварцит и плавиковый шпат – 2–3.

Таблица 2  
Химический состав шихтовых материалов, %

Наименование материалов	C	A <sup>c</sup>	V <sup>r</sup>	W <sup>a</sup>	Si	Al	Fe	SiO <sub>2</sub>	CaO	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Кокс	84,6	7,6	2,7	5,1	–	–	–	–	–	–	–
Полукокс	53,0	27,0	7,0	8,6	–	–	–	–	–	–	–
Алюминий	–	–	–	–	0,3	99,6	0,2	–	–	–	–
Чугунная стружка	4,4	–	–	–	–	–	ост.	–	–	–	–
Известь	–	–	–	–	–	–	–	–	91,1	–	–
Кварцит	–	–	–	–	–	–	–	97,5	–	–	–
Плавиковый шпат	–	–	–	–	–	–	–	–	–	92,0	–
Глинозем	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	98,7

Крупность шихтовых материалов, мм: концентрат кондиционный – 0,3–1,2; концентрат черновой – до 3; кокс – до 3; ферросилиций, силикоалюминий и алюминий – 0,5–2; чугунная стружка – 0,2–0,4; известь, кварцит и плавиковый шпат – 2–3.

Трудность проведения пироселекции связана с тем, что в результате плавки необходимо при глубоком восстановлении и переходе в металл фосфора практически полностью оставить в шлаке ниобий. В то же время селективное восстановление является сложным физико-химическим комплексом процессов восстановления различных оксидов, взаимодействия корольков восстановленного металла между собой и со шлаком, коагуляции металлических капель, их осаждения и т. д.

В лабораторных условиях изучались физико-химические характеристики концентратов и влияние различных факторов (количества и вида восстановителя, флюса и осадителя, вязкости расплава, температуры процесса, его продолжительности) на селективное восстановление железа и фосфора, обеспечивающее получение шлака, в котором Nb/P > 20.

Вязкость концентрата резко снижалась при 1350 °С, достигая значений < 0,1 Н·с/м<sup>2</sup>, добавка плавикового шпата и глинозема (последний в меньшей степени) понижала вязкость, интервал плавления снижался на 40–50 °С.

Была установлена целесообразность 2-х ступенчатой плавки. На 1-й ступени при 1260–1450 °С проводили восстановление железа и фосфора, на 2-й – при 1410–1450 °С после окончания реакции восстановления снижали вязкость расплава и осаждали корольки металла.

В качестве осадителя испытывались чугунная стружка и магнетитовый продукт (80 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в количестве соответственно от 2 до 15 и от 3,6 до 26,8 г на 100 г концентрата (одинаковое количество по Fe), количество углерода кокса и чугуна принимали из расчета на восстановление P и Fe (рис. 1). В плавках с магнетитовым продуктом дефосфорация концентрата проходила достаточно полно, однако значительны были и потери ниобия из-за повышенного количества коксика в шихте (на восстановление железа магнетита), реагирующего с оксидами в верхних слоях на границе расплав-кокс. В плавках с чугунной стружкой содержание фосфора с увеличением чугуна снижалось без значительного перехода ниобия в металл. Экспериментально было определено оптимальное количество шихтовых материалов: кокса не менее стехиометрически необходимого на восстановление железа и фосфора, чугунной стружки ~ 15 % от массы концентрата.

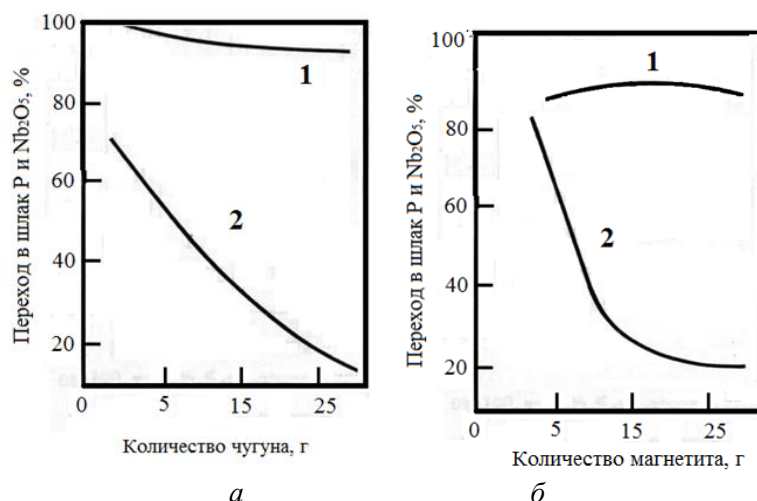


Рис. 1 Переход ниобия (1) и фосфора (2) в шлак в зависимости от количества магнетитового (а) продукта и чугуна (б) в шихте

Было показано, что карботермическим восстановлением возможно проводить селективное отделение и осаждение фосфора и железа из кондиционного ниобиевого концентрата до необходимых пределов при незначительном восстановлении ниобия (до 1–2 %) по 2-х ступенчатой схеме: шихту из концентрата, кокса и чугунной стружки плавил в электропечи при 1260–1300 °С около 40 мин., затем температуру поднимали до 1410–1450 °С и производили выдержку 20–25 мин. Эта схема была рекомендована для дальнейших полупромышленных испытаний. Получаемый обесфосфоренный шлак после дробления может быть использован для выплавки по известным технологиям [13, 14] феррониобия или других ниобиевых ферросплавов.

Полупромышленные эксперименты проводились в двухэлектродной электропечи с мощностью трансформатора 50 кВА, футерованной магнезитовым кирпичом. Было проведено 12 плавков.

Плавки показали, что в дуговой печи можно провести селективное восстановление P и Fe (в металл удаляется до 91 % P) без значительного восстановления ниобия. Оптимальным для пироселекции явился ступенчатый процесс с минимальной температурой в первый период (~ 1260 °С) и повышенной (~ 1450 °С) во второй. Удаление фосфора проводилось до низких значений (~ 0,15 % P в шлаке). Важным условием успешной пироселекции в дуговой электропечи явился подбор электрических параметров плавки, поскольку от него зависела степень локальных перегревов, улет элементов, участие в восстановлении углерода. Лучшие результаты по пироселекции получены при избытке углерода в шихте 30 % (от стехиометрически необходимого на восстановление P и Fe).

Промышленные плавки по дефосфорации пироселекцией кондиционных концентратов были проведены в печи с трансформатором мощностью 1100 кВА.

В качестве сырья применялись кондиционный ниобиевый концентрат ( $\text{Nb}_2\text{O}_5 = 38,0\%$ ;  $\text{P}_2\text{O}_5 = 4,5\text{--}6,4\%$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 11,4\text{--}14,6\%$ ), чугунная стружка и кокс ( $68\text{--}73\%$  С).

Для достижения в шлаке низкого фосфора ( $< 0,5\%$ ) при незначительном восстановлении ниобия следовало иметь в шихте избыток восстановителя  $20\text{--}40\%$ .

### **Заключение**

Были получены удовлетворительные результаты. Расход электроэнергии на 1 т шлака составил от  $1600\text{--}1900$  до  $970\text{--}1060$  кВт·ч. Содержание фосфора в шлаке находилось на достаточно низком уровне –  $0,1\text{--}0,3\%$  при  $\text{Nb}_2\text{O}_5 = 34\text{--}39\%$ , около  $99\%$  фосфора перешло в металл и в газовую фазу, восстановление и переход ниобия в металл составили менее  $1\%$ . Всего было получено 3 т шлака.

Промышленная технология показала принципиальную возможность проведения дефосфорации пироселекцией в электропечи с удовлетворительными показателями.

Полученный низкофосфористый ниобийсодержащий шлак после дробления может быть использован для производства феррониобия по существующим технологическим схемам.

*В работе принимал участие Мальцев Ю. Б.*

*Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН.*

### **Библиографический список**

1. Zhuchkov V. I., Leontiev L. I., Dashevskiy V. Y. Situation and development of ferroalloy metallurgy in Russia // Theoretical and practical conference with international participation and School for young scientists «FERROALLOYS: Development prospects of metallurgy and machine building based on completed Research and Development». Knowledge E Materials Science. 2019. С. 1–14.
2. Zhuchkov V. I., Zayakin O. V., Leont'ev L. I. [and etc.] Main Trends in the Processing of Poor Chrome Ore Raw Materials // Russian Metallurgy (Metally). – Vol. 2008. – No. 8. – P. 709–712.
3. Gasik M. I., Gladkikh V. A., Zhdanov A. V. [and etc.] Calculation of the Value of Manganese Ore Raw Materials // Russian Metallurgy (Metally). – Vol. 2009. – No. 8. – P. 756–758.
4. Nishimura I., Matsumara S. // In. Proc. Inter. Symp. Tantalum and Niobium. Goslar (Germany), 1995. – P. 355–369.
5. Tu Jui-Fan, Yang Kuo-Cheng, Chiang Lung-Jen et al. The effects niobium and molybdenum Co-additions on bending property of hot stamping steels // SEASIS Quarterly Journal. 2017. Vol. 46. no. 1. – pp. 55–59.
6. Mayorov V. G., Nikolaev A. I. Tantalum (V) and niobium (V) extraction by octanol // Hydrometallurgy. 2002. №66. – P.77–83.
7. Мелентьев Г. Б. Перспективы обеспечения собственным редкометальным сырьем и развития производств феррониобия в России / Г. Б. Мелентьев // Труды конф. «Перспективы развития металлургии и машиностроения»: ФЕРРОСПЛАВЫ. – Екатеринбург : ООО изд. «АльфаПринт», 2018. – С. 36–45.
8. Mashkovtsev G. A., Bakanova T. V. On Mineral Resources for Ferroalloy Production // Theoretical and practical conference with international participation and School for young scientists «FERROALLOYS: Development prospects of metallurgy and machine building based on completed Research and Development». Knowledge E Materials Science. 2019. С. 29–45.
9. Жучков В. И. Изучение физико-химических характеристик процессов пирометаллургической переработки фосфористого ниобийсодержащего сырья. Физико-химические свойства металлургических расплавов / В. И. Жучков, Н. А. Ватолин, Г. К. Моисеев // Тр. ин-та металлургии УНЦ АН СССР. Вып. 31. – Свердловск, 1978. – С. 70–84.

10. Стулов П. Е. Разработка технологии выплавки феррониобия и ниобийсодержащих сплавов из концентратов руд Большетагнинского месторождения / П. Е. Стулов, А. Н. Серегин, В. С. Пикалова // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2012. – № 4. – С. 5–11.

11. Темнов А. В. Сценарии реализации минерально–сырьевого потенциала комплексных редкометальных месторождений Зиминского рудного района / А. В. Темнов, В. С. Пикалова // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 7. – С. 54–60.

12. Лякишев Н. П. Легирующие сплавы и стали с ниобием / Н. П. Лякишев, Н. А. Тулин, Ю. Л. Плинер. – Москва : Металлургия, 1981. – 192 с.

13. Лякишев Н. П. Аллюминотермия / Н. П. Лякишев, Ю. Л. Плинер, Г. Ф. Игнатенко [и др.]. – Москва : Металлургия, 1978. – 422 с.

14. Резниченко В. А. Металлургия вольфрама, молибдена и ниобия / В. А. Резниченко. – Москва : Наука, 1967. – 224 с.

## ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО РУДНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ФЕРРОСПЛАВОВ

**Жучков Владимир Иванович,**

**Заякин Олег Вадимович,**

E-Mail: [zferro@mail.ru](mailto:zferro@mail.ru),

Институт металлургии УрО РАН,

г. Екатеринбург,

**Леонтьев Леопольд Игоревич,**

E-Mail: [leo@presidium.ras.ru](mailto:leo@presidium.ras.ru),

Президиум Российской академии наук,

г. Москва,

**Дашевский Вениамин Яковлевич,**

E-Mail: [vdashev@imet.ac.ru](mailto:vdashev@imet.ac.ru),

Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН,

г. Москва

**Аннотация.** Структура производства ферросплавов в РФ предопределена запасами отечественного сырья. В работе рассмотрена российская рудно-сырьевая база производства марганцевых, хромовых, ниобиевых, вольфрамовых ферросплавов. В нашей стране сложилась применительно к ферросплавному производству сложная ситуация: сырьевая импортная зависимость производства при наличии собственной крупной, хотя и не вполне качественной, в соответствии с мировыми стандартами, минерально-сырьевой базы. Только немногие виды сплавов выпускаются на отечественных заводах из собственного сырья (ферросилиций, ванадиевые сплавы). Основное количество ферросплавов либо завозится из-за рубежа, либо выплавляется у нас из импортного сырья. Одной из главных причин такого положения (помимо организационных и финансовых) является устоявшийся консервативный подход к технологии выплавки ферросплавов с применением однотипного рудного сырья и получением стандартной гостированной продукции.

Отечественное ферросплавное сырье, как правило, отличается низким качеством: малым содержанием ведущих элементов (марганцевые, хромовые руды), высоким содержанием фосфора (марганцевые, ниобиевые руды), серы (марганцевые руды). В работе приведены примеры проведения комплекса физико-химических исследований и создания ряда альтернативных технологий выплавки новых составов ферросплавов с Mn, Cr, Nb, W. Вместе с разработкой технологии проведены научные исследования по изучению влияния

на потребительские свойства ферросплавов их состава. Это связано с тем, что химический состав руд большинства новых месторождений не может обеспечить получение стандартных по всем элементам ферросплавов. Показано, что из нетрадиционного отечественного минерального сырья на основе глубоких физико-химических и технологических изысканий реально создавать новые процессы и комбинации разных видов ферросплавов, не уступающих по своим технико-экономическим показателям продукции, полученной из богатых импортных рудных материалов.

**Ключевые слова.** Металлургия, ферросплав, рудно-сырьевая база, физико-химические исследования, альтернативные технологии, металлургические характеристики.

### Введение

В настоящее время в условиях возрастающих требований к качеству металла, создания новых видов продукции с уникальными свойствами, значимость ферросплавного производства постоянно растет.

Развитию этого производства мешает увеличивающийся разрыв между потребностью в количестве и улучшении качества рудного сырья и снижающимися запасами высококачественных руд.

### Результаты и обсуждение

В настоящее время в мире производится около 40 млн. т различных ферросплавов, в России ~ 2 млн. т.

Структура производства ферросплавов в мире и России различна (см. рис.). Мировая структура производства ферросплавов за последние десятилетия не претерпела существенных изменений и соответствует их мировому потреблению. В мире на первом месте по объемам производства находятся марганцевые сплавы. Потребление ферросплавов в отдельных странах сбалансировано их экспортом и импортом, а производство зависит в основном от имеющейся минерально-сырьевой базы [1–4].

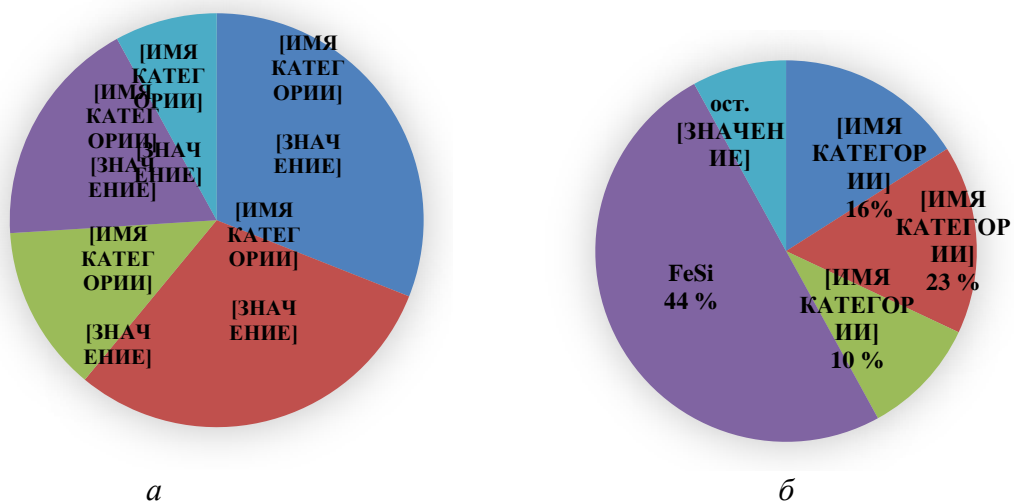


Рис. Структура производства ферросплавов в мире (а) и в России (б)

Структура производства ферросплавов в РФ также predetermined запасами отечественного сырья. Больше всего мы выпускаем кремниевых сплавов, не имеющих ограничений в сырьевой базе (49,4 %), затем марганцевых (25,8 %) и хромовых (16,4 %) ферросплавов. Остальные ферросплавы составляют ~ 9 % производства [5].

Кроме ферросплавов «большой» группы (марганцевые, хромовые, кремнистые) имеются ферросплавы «малой» группы, к которым относятся ванадиевые, ниобиевые, молибденовые, титановые и др.

Основной проблемой ферросплавного производства как в мире, так и в России является обеспеченность рудным сырьем. Только немногие виды сплавов выпускаются на отечественных заводах из собственного сырья (ферросилиций, ванадиевые сплавы). Основное количество ферросплавов либо завозится из-за рубежа, либо выплавляется у нас из импортного сырья [6, 7].

Потребность в марганцевых ферросплавах сталеплавильщиков РФ в объеме ~ 650 тыс. т мы удовлетворяем за счет импортных ферро- и силикомарганца, а остальное выплавляем у себя из зарубежного сырья (ЮАР, Казахстан, Габон). Объем этого потребления вырос с 516 тыс. т в 2002 г. до 1276 тыс. т в 2018 г. Собственная добыча марганцевых руд прекращена в 2014 г., и все поставки марганцевого сырья осуществляют по импорту. Прекратились поставки с Украины, возрос до 670 тыс. т/год импорт из Казахстана, но затем снизился до 128 тыс. т в 2018 г. Появились новые импортные потоки марганцевого концентрата из Южно-Африканской Республики (до 843 тыс. т/год) и Габона (до 338 тыс. т/год) [8].

В то же время у нас имеются запасы марганцевых руд, составляющие по категориям  $A + B + C_1 + C_2$  около 290 млн. т, а прогнозные ресурсы более 1 млрд. т.

Крупнейшим в России месторождением марганцевых руд является Усинское (Кемеровская обл.), а также Порожинское (Красноярский край), Парнокское (Республика Коми), Североуральское (Свердловская обл.). В Республике Саха обнаружены богатые (40–50 % Mn) сульфидные марганцевые руды. Несмотря на то, что отечественные марганцевые руды, в основном, бедные и высокофосфористые, многочисленные лабораторные и промышленные исследования указывают на возможность их широкого использования для получения разных видов ферросплавов [7].

В отличие от марганцевых сплавов Россия полностью обеспечивает себя хромовыми ферросплавами, полученными в основном из зарубежного сырья. Отечественные руды используются в ограниченном количестве (около 35 %). Добыча хромитовой руды в Российской Федерации находится на уровне 400 тыс. т/год при содержании  $Cr_2O_3$  в концентрате 37–39 %. Балансовые запасы ( $A + B + C_1 + C_2$ ) составляют 51,2 млн. т, прогнозные ресурсы – более 540 млн. т [9]. Добыча руды осуществляется в настоящее время на месторождениях Сарановское (Урал, Пермская обл.) и Центральное (Полярный Урал, хромитоносный массив Рай-Из Ямало-Ненецкого АО).

Российский импорт хромовых концентратов колеблется в разные годы от 640 до 1110 тыс. т/год, из которых основная доля (94 %) приходится на поставки из Казахстана.

Отечественные хромовые руды беднее импортных (38–39 %  $Cr_2O_3$  против > 45 %  $Cr_2O_3$ ), но дешевле их и могут быть использованы в более значительных объемах. Руды разных месторождений отличаются по химическому, фазовому, гранулометрическому составу и требуют индивидуального технологического подхода при их использовании [6].

Производство ферросплавов «малой» группы также характеризуется наличием собственного рудного сырья и неудовлетворяющими собственную потребность объемами выплавки ферросплавов (с Nb, Mo, W и др.) [9, 10].

Так по данным Г. А. Машковцева [9] в Иркутской обл. разведан крупный район месторождений ниобия (Белозиминское, Большетагинское, Зашихинское и др.), в Читинской обл. – Катугинское, в Красноярском крае – Татарское, Чуктугонское и др. Все месторождения отличаются друг от друга вещественным составом, в который входят пироклор, апатит, монацит, вермикулит и другие минералы.

Разведаны ряд месторождений молибдена. В республике Бурятия это Ореkitканское и Мало-Ойногорское, в Читинской обл. – Бугдаинское, в Курганской обл. – Коклановское и др.

Практически все эти месторождения не осваиваются. В России сложилась применительно к ферросплавному производству «парадоксальная ситуация: сырьевая импортная зависимость производства при наличии собственной крупной, хотя и не вполне качественной, в соответствии с мировыми стандартами, минерально-сырьевой базы» [10].

Одной из главных причин такого положения (помимо организационных и финансовых) является устоявшийся консервативный подход к технологии выплавки ферросплавов с применением однотипного рудного сырья и получением стандартной гостированной продукции.

Отечественное ферросплавное сырье, как правило, отличается низким качеством. В нем низкое содержание ведущих элементов (марганцевые, хромовые руды), высокое содержание фосфора (марганцевые, ниобиевые руды), серы (хромовые, марганцевые руды). Это требует проведение комплекса физико-химических исследований и создания ряда новых альтернативных технологий.

Вместе с разработкой технологии необходимо проводить научные исследования по изучению влияния на потребительские свойства ферросплавов их состава. Это связано с тем, что химический состав руд большинства новых месторождений не может обеспечить получение стандартных по всем элементам ферросплавов.

На основании проведенных исследований металлургических характеристик бедных хроморудных материалов, физико-химических свойств получаемых из них сплавов и промышленных научно-исследовательских работ [11–13] сформулированы 4 основные направления, которые позволяют ввести в эксплуатацию ряд известных, но не используемых (либо слабо используемых) ранее месторождений бедных хромовых руд.

1. Селективное восстановление компонентов руды с разделением на металлический полупродукт с пониженным содержанием хрома (~20 %), пригодный для выплавки коррозионностойких марок сталей, и оксидный продукт с повышенным содержанием  $Cr_2O_3$ , пригодный для выплавки высокосортных марок феррохрома.

2. Рациональная подшихтовка бедных отечественных хромовых руд к богатым импортным с производством стандартных марок феррохрома.

3. Получение новых сплавов, в т. ч. товарного высокоуглеродистого феррохрома с пониженным содержанием хрома, углерода, повышенным содержанием кремния и комплексных ферросплавов.

4. Получение передельных сортов ферро- и силикохрома и их использование при выплавке рафинированных сортов феррохрома.

Все представленные направления исследованы и в различной степени доведены до промышленного опробования и внедрения.

Для получения и применения новых ферросплавов необходимо знать их служебные характеристики. Изменять и совершенствовать характеристики сплавов следует на основе изучения их свойств, влияющих на степень усвоения ведущих компонентов сплавов.

Были проведены исследования физико-химических характеристик хромовых ферросплавов и разработка рациональных композиций их составов.

Полученные данные показали, что феррохром с повышенным содержанием кремния и пониженным содержанием хрома, а также комплексные сплавы с марганцем, получение которых возможно из бедного отечественного сырья, характеризуются более благоприятными физико-химическими свойствами по сравнению с традиционным высокопроцентным (~ 65 % Cr) феррохромом марки ФХ850 с точки зрения их применения для обработки стали. Повышение содержания кремния в высокоуглеродистом феррохроме до 10 % приводит, как показали лабораторные эксперименты, к увеличению степени усвоения хрома в сталь на 11 %. Помимо того, стандартный феррохром содержит менее 1 % кремния и используется только для легирования стали хромом. Предлагаемые сплавы могут содержать до 10 % Si и применяться не только для легирования, но и для частичного раскисления стали.

Перспективы использования бедного российского марганцевого рудного сырья во многом связаны с изучением возможности успешного применения ферро- и силикомарганца с пониженным содержанием марганца (40–55 %) и разработкой методов снижения в марганцевых ферросплавах фосфора. Подшихтовка бедной марганцевой руды к богатой также требует обоснованного научного подхода к выбору оптимального



соотношения этих двух компонентов сырья с учетом состава образующегося расплава (основности, вязкости, коэффициента распределения марганца), содержания фосфора в сплаве и т. д.

Значительный экономический интерес представляет увеличение в РФ выпуска для собственных нужд и для экспорта вольфрамовой продукции. Вольфрам в том или ином виде широко используется в металлургии и машиностроении, электрической, нефтедобывающей и химической промышленности в чистом виде, легированной стали, твердых сплавах и др. Вольфрам является выгодным для продажи материалом, цена ферровольфрама (65–75 % W) составляет 15000–35000 долл. США/т. Увеличение выпуска вольфрамсодержащей продукции при наличии значительных запасов сырья (3-е место в мире) является важной государственной задачей [2, 8, 9].

В настоящее время, по данным [9], Государственным балансом России учтены 52 коренных и 40 россыпных месторождений вольфрама. Прогнозные ресурсы ( $WO_3$ ) оцениваются в 2234 тыс. т, добыча составила в 2017 г. 3500 т. Из производственных отходов получено 929 т  $WO_3$ . Экспорт вольфрамовых концентратов составил в 2017 г. ~ 2000 т, импорт 1470 т.

Продолжается освоение месторождений Лермонтовское (Кабардино-Балкария), Холтосон (Бурятия), Бон-Горхонское (Забайкалье). Разведаны новые месторождения Агылкинское и Михайловское, в Якутии, а также ряд запасов в Западном Прибайкалье, Восточном Саяне и на севере Иркутской области. Следует отметить, что во многих отечественных рудах находится высокое содержание вольфрама (выше 1 %  $WO_3$ ).

Обогащение вольфрамсодержащих руд осуществляется преимущественно гравитационными методами, что не обеспечивает стабильного качества концентратов. Крайне остро стоит проблема очистки концентратов от примесей цветных металлов, таких как медь, мышьяк, свинец, олово, висмут, сурьма, которые не удаляются при гравитационном обогащении [14].

Полученные в результате обогащения концентраты имеют значительные колебания по содержанию вольфрама и примесям из-за различного состава руд разных месторождений и методов их обогащения. Это создает трудности при разработке технологии их переработки на товарную продукцию (металлический вольфрам, ферровольфрам и др.) Тем не менее большой арсенал технологических приемов плавки, включающий карбо-, алюмино- и силикотермический восстановительные процессы, пироселекцию, печной и внепечной способы плавки и рафинирования, позволяют разрабатывать и получать вольфрамовые продукты необходимого состава с применением рациональной технологии.

### **Заключение**

Таким образом, нами и другими исследователями было показано, что из нетрадиционного отечественного рудного сырья на основе глубоких физико-химических и технологических изысканий реально создавать новые процессы и комбинации разных видов ферросплавов, не уступающих по своим технико-экономическим показателям продукции, полученной из импортных материалов.

Для успешного решения проблемы обеспечения ферросплавной отрасли промышленности отечественным рудным сырьем необходимо объединить изыскания ученых геологов, обогатителей и металлургов, создавая комплексные коллективы и государственные проекты под руководством Российской академии наук и Министерства природных ресурсов РФ.

*Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН и по проекту РФФИ № 19-03-00451.*

## Библиографический список

1. Мухатдинов Н. Х. Стратегия развития черной металлургии России на период 2014–2020 гг. и на перспективу до 2030 г. / Н. Х. Мухатдинов, А. А. Бродов, К. А. Косырев // Сб. тр. XIII Междунар. конгр. сталеплавателей. Москва : ОАО «Северский трубный завод», 2014. – С. 18–22.
2. Боярко Г. Ю. Товарные потоки ферросплавов в России / Г. Ю. Боярко, В. Ю. Хатьков // Черные металлы. – 2018. – № 3. – С. 60–63.
3. Zhuchkov V. I., Zayakin O. V., Leont'ev L. I. [and etc.] Main Trends in the Processing of Poor Chrome Ore Raw Materials // Russian Metallurgy (Metally). – Vol. 2008. – No. 8. – P. 709–712.
4. Ходина М. А. Российский рынок марганцевой продукции / М. А. Ходина // Разведка и охрана недр. – 2017. – № 2. – С. 42–48.
5. Рынок ферросплавов в 2017–2018 г. : производство в России. Metall Research. Металлургические исследования. – URL : /www.metalresearch.ru/ferroalloys.market.2017–2018.html.
6. Zayakin O. V., Zhuchkov V. I. Promising Directions of the Application for Poor Raw Materials of the Ferroalloy Production // Theoretical and practical conference with international participation and School for young scientists «FERROALLOYS: Development prospects of metallurgy and machine building based on completed Research and Development». Knowledge E Materials Science. 2019. С. 70–76.
7. Жучков В. И. Технология марганцевых ферросплавов. Ч. 1. Высокоуглеродистый ферромарганец / В. И. Жучков, Л. А. Смирнов, В. П. Зайко, Ю. И. Воронов. – Екатеринбург : УрО РАН, 2007. – 412 с.
8. Боярко Г. Ю. Материально сырьевая база ферросплавов и особенности развития их производства в России / Г. Ю. Боярко, Б. Н. Матвеев // Черные металлы. – 2020. – № 1. – С. 17–22.
9. Mashkovtsev G. A., Bakanova T. V. On Mineral Resources for Ferroalloy Production // Theoretical and practical conference with international participation and School for young scientists «FERROALLOYS: Development prospects of metallurgy and machine building based on completed Research and Development». Knowledge E Materials Science. 2019. С. 29–45.
10. Мелентьев Г. Б. Перспективы обеспечения собственным редкометальным сырьем и развития производств феррониобия в России / Г. Б. Мелентьев // Труды конф. «Перспективы развития металлургии и машиностроения»: ФЕРРОСПЛАВЫ. Екатеринбург : АльфаПринт, 2018. – С. 36–45.
11. Gal'perin L. L., Zayakin O. V., Ostrovskii Ya. I. [and etc.] Production of high-carbon ferrochromium from various types of chromium ore // Steel in Translation. – 2003. – Vol. 33(11), P. 38–41.
12. Esenzhulov A. B., Ostrovskii Ya. I., Afanas'ev V. I. [and etc.] Russian Chromium Ore in Smelting High-Carbon Ferrochrome at ОАО SZF // Steel in Translation. – 2008. – Vol. 38. – №4. P. 315–317.
13. Gasik M. I., Gladkikh V. A., Zhdanov A. V. [and etc.] Calculation of the Value of Manganese Ore Raw Materials // Russian Metallurgy (Metally). – Vol. 2009. – No. 8. – P. 756–758.
14. Пашкеев И. Ю. Аллюминотермия ферровольфрама / И. Ю. Пашкеев, К. Ю. Пашкеев, Г. Г. Михайлов. – Челябинск : Изд. Центр ЮУрГУ, 2018. – 142 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВСКРЫТИЯ УПОРНЫХ АРСЕНОПИРИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ ПРИ ПОМОЩИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЖИГА

**Звонцов Никита Олегович,**

E-Mail: [zvontsovno@mail.ru](mailto:zvontsovno@mail.ru),

**Рогожников Денис Александрович,**

E-Mail: [darogozhnikov@yandex.ru](mailto:darogozhnikov@yandex.ru),

Уральский федеральный университет,  
кафедра Metallургии цветных металлов,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** В статье описывается альтернативный способ предварительной обработки упорных арсенопиритовых концентратов при помощи низкотемпературного обжига. Процесс заключается в проведении окислительного обжига в диапазоне температур 200–400 °С – относительно низких для традиционного процесса. Приводятся результаты расчетов равновесного состава продуктов обжига на примере флотационного золотосодержащего концентрата Удере́йского месторождения в программе HSCChemistry 6. Основными минералами концентрата, содержащими в себе золото, являются пирит ( $\text{FeS}_2$ ) и арсенопирит ( $\text{FeAsS}$ ). Кроме того, концентрат Удере́йского месторождения характерен присутствием сурьмы в форме  $\text{Sb}_2\text{S}_3$ . В ходе проведения расчетов равновесного состава были подобраны необходимые условия для проведения низкотемпературного обжига. Обнаружено, что при данных условиях происходит диссоциация высших сульфидов, мышьяк переходит в форму трисульфида ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), основная часть железа переходит в форму сульфата ( $\text{FeSO}_4$ ). Все это говорит о том, что процесс низкотемпературного обжига позволяет произвести вскрытие упорного концентрата и получить огарок, дальнейшая переработка которого не вызовет особых проблем: нелетучая форма три сульфида мышьяка позволяет избежать проблем с очисткой токсичных газов, а наличие сульфата железа упрощает дальнейшую гидрометаллургическую переработку.

**Ключевые слова.** Упорные золотосодержащие руды, арсенопиритовый концентрат, извлечение золота, окислительный низкотемпературный обжиг, расчет равновесного состава.

## Введение

Главной причиной упорности арсенопиритовых концентратов является тонкая вкрапленность золота в основных вмещающих минералах – арсенопирите ( $\text{FeAsS}$ ) и пирите ( $\text{FeS}_2$ ). Золото в таких минералах содержится в субмикроскопическом виде, что не позволяет извлечь его без их предварительного вскрытия. Доказано, что упорность золота, ассоциированного с сульфидами, связана с наличием не только наночастиц самородного золота, но также твердого раствора, коллоидных частиц, поверхностного золота. Присутствие в составе руд и концентратов сорбционно-активных частиц, например органического углерода, также приводит к проявлению упорности золота [1–3].

Основная цель предварительной обработки подобных упорных материалов заключается в окислении золотосодержащих минералов с целью разрушения их кристаллической решетки и высвобождения частиц золота. Наиболее распространенными методами являются автоклавное и бактериальное окисление, операции термического разложения, гидрометаллургического вскрытия с предварительным тонким измельчением [4–6]. Однако данные способы влекут за собой большие затраты на расходные материалы, такие как штаммы бактерий, реагенты для выщелачивания и др. Другой достаточно эффективный способ – плавка [7]. Его преимуществом является то, что, при расплавлении частиц концентрата высвобождение частиц золота происходит само собой и нет

необходимости в предварительной обработке. Но и у этого способа есть свои недостатки: в печных газах может содержаться значительная доля мышьяка и серы, на очистку от которых также идут большие затраты.

Окислительный обжиг является одним из самых экономичных способов предварительной обработки упорных золотосодержащих концентратов. Однако, для достижения нужного извлечения, обжиг часто проводят в две или даже три стадии. Поскольку одностадийный обжиг обеспечивает значительную экономию, как капитальных вложений, так и эксплуатационных расходов, большая часть исследований в разных странах сосредоточена на оптимизации условий одностадийного обжига, которые могут обеспечить извлечение золота, сопоставимое с двух стадийными процессами [8–9].

В свою очередь способ низкотемпературного обжига позволяет не только перевести мышьяк в форму трисульфида, но и перевести часть железа в форму сульфата, что позволит значительно сократить затраты эксплуатационных расходов при очистке отходящих газов и на дальнейших этапах выщелачивания полученного огарка.

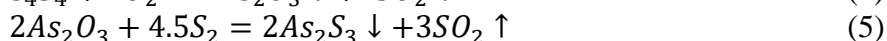
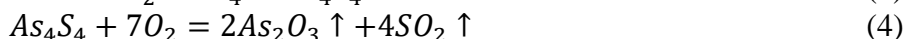
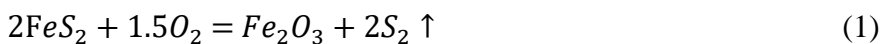
### Низкотемпературный обжиг

Обжиг называется низкотемпературным, поскольку он проводится при низких температурах относительно традиционного окислительного обжига: в диапазоне 200–400 °С. При таких температурах реакции протекают не так интенсивно, как при традиционном обжиге (500–700 °С) [10], однако это позволяет избежать подплавления частиц концентрата – типичной проблемы обжиговых процессов.

Главной целью обжига является диссоциация высших сульфидов концентрата ( $\text{FeAsSi FeS}_2$ ) и перевод мышьяка в нелетучий  $\text{As}_2\text{S}_3$ . Поскольку в такой форме мышьяк не попадет в печные газы, то он не причинит дополнительных проблем при их очистке. То же самое можно сказать и о дальнейшей переработке огарка – от трисульфида мышьяка можно будет легко избавиться при помощи выщелачивания серной либо азотной кислотой [11].

Проблемой для такого обжига является поиск оптимальных условий для достижения необходимого результата. Основные параметры, влияющие на эффективность процесса: температура и количество кислорода. Несмотря на то, что при температурах от 200 до 400 °С реакции протекают не столь интенсивно, их скорость может компенсироваться количеством подаваемого дутья. Однако в этом случае есть риск сильно увеличить температуру обжига за счет экзотермических реакций окисления серы. Поэтому при проведении низкотемпературного обжига необходимо постоянно контролировать температуру и объем подаваемого кислорода [12].

Ниже приведены основные реакции, протекающие в процессе низкотемпературного обжига, а также значения изменений энергии Гиббса и логарифмов констант равновесия, рассчитанные для интервала температур 200–450 °С (табл. 1, 2)[13].



По результатам расчетов значений изменения энергии Гиббса и логарифмов констант равновесия реакций из табл. 1 и 2 можно сделать вывод о высокой термодинамической вероятности протекания реакций 1–8 в рассматриваемых условиях низкотемпературного обжига.

Таблица 1  
Расчеты изменения энергии Гиббса, кДж/моль, для реакций 1–8

T, °C	Номер реакции, ΔG, кДж/моль							
	1	2	3	4	5	6	7	8
200	-284,546	-127,284	-258,215	-1755,855	-680,344	-1367,174	-108,743	-174,482
250	-291,197	-133,336	-241,730	-1747,596	-646,841	-1365,746	-99,278	-164,970
300	-297,898	-139,543	-225,364	-1739,152	-613,655	-1364,294	-89,824	-155,520
350	-304,653	-145,903	-209,105	-1730,553	-584,665	-1362,833	-80,388	-146,132
400	-311,465	-152,243	-192,945	-1721,820	-557,587	-1361,375	-70,973	-136,807
450	-318,337	-158,438	-176,877	-1712,970	-531,220	-1359,923	-61,582	-127,541

Таблица 2  
Расчеты логарифмов констант равновесия, для реакций 1-8

T, °C	Номер реакции, lnK <sub>p</sub>							
	1	2	3	4	5	6	7	8
200	31,416	14,053	28,509	193,859	75,115	150,946	12,006	19,264
250	29,077	13,314	24,138	174,506	64,590	136,376	9,913	16,473
300	27,152	12,718	20,540	158,513	55,931	124,347	8,187	14,175
350	25,539	12,231	17,529	145,073	49,013	114,247	6,739	12,250
400	24,171	11,815	14,973	133,620	43,271	105,648	5,508	10,617
450	22,996	11,445	12,777	123,742	38,374	98,238	4,449	9,213

Для определения искомых параметров проведения процесса низкотемпературного обжига были произведены расчеты равновесного состава продуктов процесса при определенных условиях температуры и объема дутья. Расчеты сделаны на примере золотосодержащего концентрата Удерейского месторождения в программе *HSCChemistry 6*.

#### Расчет равновесного состава

Для определения необходимых параметров низкотемпературного обжига использован модуль «*Equilibrium compositions*» пакета прикладных программ *HSCChemistry 6*. Модуль предназначен для вычисления равновесных составов контактирующих фаз, принимающих участие в технологических процессах. В нашем случае рассматриваются только две фазы: твердая и газообразная. Твердая фаза состоит из исходного концентрата и образующегося в ходе процесса огарка. Газообразная фаза представлена воздушным дутьем и образующимися печными газами, состоящими, в основном, из диоксида серы (SO<sub>2</sub>) [14].

В качестве исходного материала для расчетов был взят концентрат Удерейского месторождения. Золотосодержащие руды данного месторождения, помимо основных компонентов в виде пирита и арсенопирита, характеризуются наличием в руде сурьмы.

Рациональный состав на 100 кг данного концентрата приведен в табл. 3.

Таблица 3  
Рациональный состав концентрата Удерейского месторождения

	Fe	S	Sb	As	Si	Al	O	Прочие	Итого
FeS <sub>2</sub>	12,49	14,28							26,77
FeAsS	9,12	5,21		12,21					26,55
Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>		0,71	1,81						2,52
SiO <sub>2</sub>					10,72		12,25		22,97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						3,69	3,28		6,97
Прочие								14,22	14,22
Итого	21,61	20,20	1,81	12,21	10,72	3,69	15,53	14,22	100,0

Расчеты равновесного состава проводили при различных температурах и количестве кислорода на 100 кг концентрата (рис. 1–3).

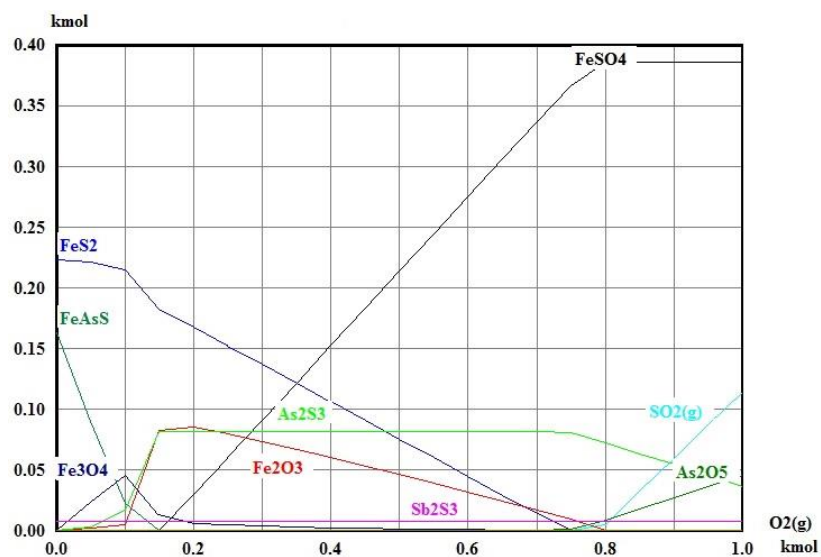


Рис. 1 Равновесный состав продуктов низкотемпературного обжига при 200 °С

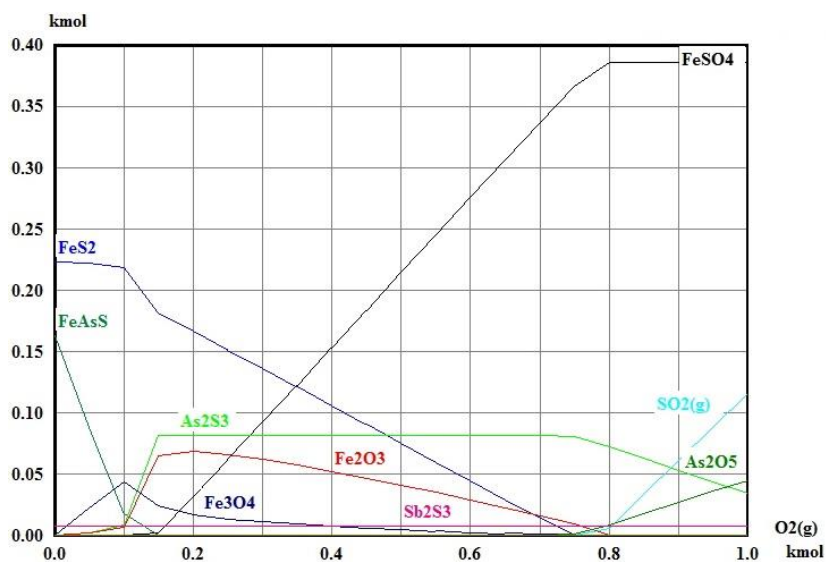


Рис. 2 Равновесный состав продуктов низкотемпературного обжига при 350 °С

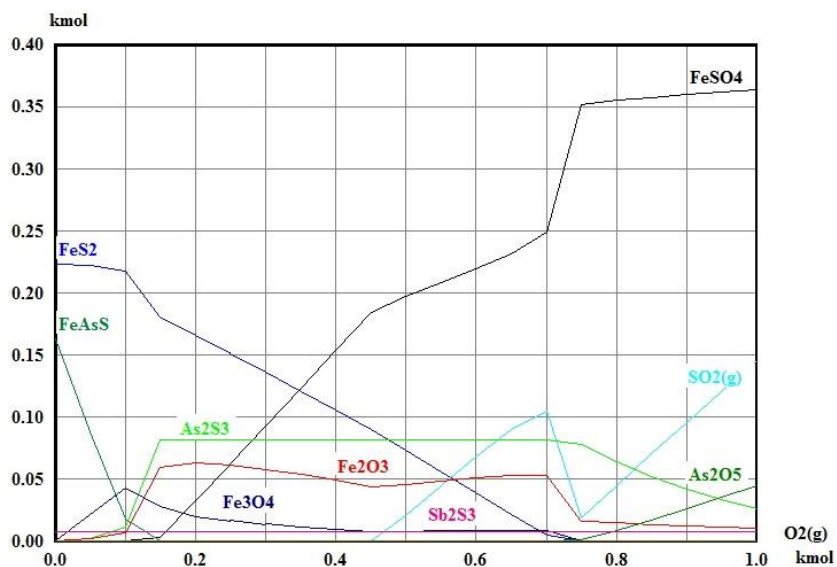


Рис. 3 Равновесный состав продуктов низкотемпературного обжига при 400 °С

Как показано на рис. 1–3 наиболее подходящим является расход 0,6–0,7 кмоль кислорода на 100 кг концентрата, поскольку в данном диапазоне поддерживается максимальное количество мышьяка в форме трисульфида. Также при таком количестве кислорода образуется максимально возможное количество сульфата железа при условии, что весь мышьяк останется в форме трисульфида. При дальнейшем увеличении количества кислорода происходит образование летучего  $As_2O_5$ , что противоречит цели данного процесса – перевести весь мышьяк в нелетучую форму и оставить его в огарке. Результаты расчетов при температурах 250 и 300 °С сопоставимы с результатами расчетов при температурах 200 и 350 °С. Наилучшего результата можно достичь при высоких температурах данного обжига (рис. 2, 3), поскольку при температурах 350–400 °С реакции окисления будут протекать быстрее, чем при 200–300 °С, что позволит снизить эксплуатационные расходы.

Как показано на рис. 3 при температуре 400 °С кривая  $SO_2$  начинает изменяться и содержание серы в печных газах заметно возрастает при повышении количества кислорода, что говорит об увеличении интенсивности протекания экзотермических реакций окисления серы. В этом случае существует риск допустить оплавление частиц огарка и тем самым только усложнить дальнейшее извлечение золота. Из этого можно сделать вывод, что при температурах более 400 °С проводить обжиг нецелесообразно.

На всех рисунках показано, что количество  $Sb_2S_3$  представлено в виде прямой линии и не изменяется на протяжении реакции. Это означает, что сурьма, известная своей летучестью и токсичностью, никак не повлияет на результаты процесса в данных условиях.

#### **Заключение**

Расчеты равновесного состава проведены с целью поиска наиболее подходящих условий проведения обжига. Обжиг при таких условиях предназначен для получения огарка с содержанием мышьяка в форме трисульфида, что подтверждается на рис. 1–3. По результатам расчетов можно сделать вывод, что наиболее подходящими условиями проведения низкотемпературного обжига являются: температура в диапазоне 350–400 °С и 0,6–0,7 кмоль кислорода на 100 кг обжигаемого концентрата.

Кроме того, на рис. 1–3 показано, что даже при 0,7 кмоль  $O_2$  не происходит полная диссоциация пирита. Это говорит о том, что вскрытие произошло не полностью и некоторая часть золота все же может оставаться в закрытом состоянии и будет труднодоступной для извлечения. Однако все же степень вскрытия пирита на уровне 90 % говорит о высокой степени эффективности низкотемпературного обжига в качестве предварительной обработки концентрата. Стоит также отметить, что степень вскрытия арсенопирита близка к 100 %. Так как основной целью низкотемпературного обжига является перевод всего мышьяка в форму трисульфида, результаты работы можно считать удовлетворительными.

На данном этапе поисковых исследований имеется положительный результат расчетов и подобраны необходимые параметры проведения обжига, что является основанием для продолжения исследований в данном направлении. В дальнейшем планируется провести эксперименты для подтверждения и уточнения полученных расчетных данных.

#### **Библиографический список**

1. Захаров Б. А. Золото: упорные руды : научное издание / Б. А. Захаров, М. А. Меретуков. – Москва : Руда и Металлы, 2013. – 452 с. – ISBN 978-5-98191-068-5.
2. Гуляшинов П. А. Исследование процесса обжига золотосодержащей скородитовой руды / П. А. Гуляшинов, П. Л. Палеев, А. Н. Гуляшинов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – Т. 20. – № 10. – 2016. – С. 154–162. – DOI: 10.21285/1814-3520-2016-10-154-162.

3. Bazhko V. Evaluation of ozonation technology for gold recovery and cyanide management during processing of a double refractory gold ore / V. Bazhko, V. Yahorava // *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Volume 117. – 08.2017. – P. 749–756.
4. Литвинова Н. М. Совершенствование технологических методов измельчения упорных золотосодержащих руд : автореферат дис. ... канд.техн.наук : 25.00.13 / Н. М. Литвинова. – Хабаровск, 2008. – 21 с.
5. Полежаев С. Ю. Повышение извлечения золота в технологии автоклавного окисления концентратов «двойной упорности» путем предварительной термической обработки : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / С. Ю. Полежаев ; Нац. мин.-сыр. унив. «Горный». – Санкт-Петербург, 2015. – 132 с.
6. Leng F. Arsenic bioleaching in medical realgar ore and arsenic-bearing refractory gold ore by combination of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* – original research article / F. Leng, S. Sun, Y. Wang at al. // *Tropical journal of pharmaceutical research*, Benin. – May 2016. – P. 1031–1038.
7. Seitkan A. Processing double refractory gold-arsenic-bearing concentrates by direct reductive melting / A. Seitkan, S. A. T. Redfern // *Minerals engineering*, Elsevier. – 23th Aug 2016. – P. 286–302.
8. Zhang D. Acid leaching decarbonization and following pressure oxidation of carbonic refractory gold ore / D. Zhang, Q. Xiao, W. Liu, L. Chen etc. // *J. Cent. South Univ. and Springer* – 2016. – P. 1584–1590. – DOI: 10.1007/s11771-016-3212-z.
9. Лодейщиков В. В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд: в 2-х т. / В. В. Лодейщиков. – Иркутск : ОАО «Иргиредмет», 1999. – 775 с.
10. De Michelis I. Roasting and chlorine leaching of gold-bearing refractory concentrate: experimental and process analysis / I. De Michelis, A. Olivieri, S. Ubaldini at al. // *International journal of mining science and technology*, Elsevier. – 25th Feb 2013. – P. 709–715.
11. Лидин Р. А. Химические свойства неорганических веществ: учеб. пособие для вузов. 3-е изд. Испр. / Р. А. Лидин, В. А. Молочко, Л. Л. Андреева. – Москва : Химия, 2000. – 480 с. – ISBN 5-7245-1163-0.
12. Liu X. Simultaneous removal of S and As from a refractory gold ore in a single stage O<sub>2</sub>-enriched roasting process / X. Liu, Q. Li, Y. Zhang at al. // *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2019*, Volume 50B. – August 2019. – P. 1588–1596.
13. Набойченко С. С. Процессы и аппараты цветной металлургии : учеб. пособие для студентов / С. С. Набойченко, Н. Г. Агеев, В. П. Жуков [и др.]. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2015. – 700 с.
14. Агеев Н. Г. Металлургические расчеты с использованием пакета прикладных программ HSC Chemistry : учеб. пособие / Н. Г. Агеев, С. С. Набойченко. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2016. – 124 с.



## СИНТЕТИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ – ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Земляной Кирилл Геннадьевич,**

E-Mail: kir77766617@yandex.ru,

**Хафизова Алина Руслановна,**

E-Mail: khafizova.alina@urfu.ru,

Уральский федеральный университет,  
Институт новых материалов и технологий,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Представлен анализ видов разрушения огнеупорных материалов и групп факторов, вызывающих эти разрушения в процессе эксплуатации огнеупоров. Показано, что одной из причин, препятствующих дальнейшему увеличению стойкости огнеупоров, является естественный барьер наличия примесей в природном сырье для производства огнеупоров. Предложен способ более глубокого обогащения природного и/или техногенного сырья методами гидрохимической переработки.

**Ключевые слова.** Огнеупорные материалы, виды износа, содержание примесей, огнеупорное сырье, гидрохимические методы получения.

Технология производства огнеупорных материалов всегда развивается совместно с развитием технологий металлургических процессов. Качество огнеупоров и футеровки определяется, и в свою очередь определяет производительность и эффективность работы тепловых металлургических агрегатов. Повышение требований к металлургическим процессам, как по интенсивности производства, так и по качеству металла приводит к повышению требований к стойкости огнеупорных материалов и футеровок в целом [1–3], которые оцениваются по снижению удельного расхода огнеупоров на единицу получаемой продукции.

В зависимости от природы фазово-структурных превращений, протекающих при эксплуатации огнеупоров в различных средах и условиях, установлены восемь видов их износа:

- 1) высокотемпературная химическая коррозия;
- 2) термическое скалывание;
- 3) структурное разупрочнение (перерождение или «старение» огнеупора);
- 4) оплавление;
- 5) пиропластическая деформация;
- 6) расплавная эрозия;
- 7) газофазная сублимация и эрозия;
- 8) механическое разрушение.

На долю двух первых видов приходится в сумме 80–90 % случаев выхода огнеупорных футеровок из строя. В реальности, как правило, происходит одновременное воздействие нескольких видов износа.

На вид и интенсивность вышеуказанных фазово-структурных превращений огнеупоров при эксплуатации футеровок тепловых агрегатов оказывает влияние большое число факторов:

- 1) химическое и фазовое соответствие огнеупора агрессивному фактору (расплаву, составу газовой среды, пыли);
- 2) соответствие структуры огнеупора условиям эксплуатации (по плотности и прочности, по газопроницаемости и расплавопроницаемости, теплопроводности и термостойкости);
- 3) соблюдения штатного режима эксплуатации теплового агрегата;

4) термоэнергоплотность огнеупорного материала (характеризует плотность энергии в одном см<sup>3</sup> кристаллической фазы с учетом ее температуры плавления, (кДж×град)/см<sup>3</sup>);

5) состав и количество примесей в огнеупоре, образующих с агрессивным химическим фактором легкоплавкие соединения и расплавы с малой вязкостью при рабочих температурах теплового агрегата.

Соответствие огнеупорного материала / изделий некоторым из указанных факторов закладывается на стадии проектирования футеровки и выбора типа и вида огнеупора (1-й и 2-й факторы); воздействие условий эксплуатации (3-й фактор) зависят только от технологической дисциплины потребителя. Термоэнергоплотность – комплексная характеристика, зависящая от вида выбранной огнеупорной фазы (типа химической связи, параметров кристаллической решетки), способа получения материала и изделия. Состав и количество примесей в огнеупоре зависит от используемого сырья (природного или синтетического) и способа получения материала и изделий (вводимых в процессе получения функциональных добавок и возможности удаления более легкоплавких/подвижных компонентов в процессе получения огнеупора).

И если первые 4-е фактора довольно легко регулируются и/или задаются в процессе подготовки и реализации технологических процессов в металлургии и производства огнеупоров и, теоретически, могут бесконечно совершенствоваться по мере развития науки и увеличения массы эмпирических наблюдений, то у 5-го фактора есть естественный и вполне очевидный предел развития, к которому в настоящее время подошли практически все производители огнеупорной продукции.

Это очень хорошо заметно на номенклатуре основных для черной металлургии периклазовых и периклазоуглеродистых огнеупоров: ГОСТ 28874–2004 (переиздание ГОСТ 28874–90) «Огнеупоры. Классификация» относит к периклазовым все огнеупорные материалы, содержащие от 85 мас. % MgO включительно. В ГОСТ 4689–94 «Изделия огнеупорные периклазовые. Технические условия» содержание MgO в огнеупорах начинается с 89 мас. %. Еще 5 лет назад качественными считались периклазовые и/или периклазоуглеродистые изделия с содержанием MgO 95 мас. %. В настоящее время мы используем периклаз марки 97 (97,0–97,5 мас. % MgO), и говорим о желательности марки 98, а еще лучше 99 [4–7].

Но природного сырья такого качества нет, учитывая основной тип генезиса магнезиального сырья в природе (перекристаллизация в морской воде карбонатов кальция в карбонаты магния) любое магнезиальное сырье обязательно будет содержать некоторое количество ионов кальция в твердом растворе в магнезиальной решетке. И никакими методами механического и/или пиротехнического обогащения от них избавиться невозможно. То же самое относится к оксиду железа (II), образующим с оксидом магния твердые растворы, и, в более широком смысле – к любому природному сырью.

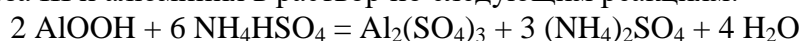
Таким образом, в настоящее время становится все более очевидным и актуальным химическое обогащение природного и/или химический синтез искусственного сырья для производства огнеупоров с повышенной стойкостью. И такие примеры уже существуют, например, продолжая тему магнезиального сырья: целый ряд производителей получает переработкой природных рассолов (морская вода, природные бишофиты, рапы) оксид магния с чистотой до 99,99 мас. % MgO (магнезия жженая) для химической, электрометаллургической, электронной, керамической промышленности, медицины. Основными производителями оксида магния из морской воды являются США, Нидерланды, Япония, Мексика, Израиль, Ирландия, Иордания [8, 9]. И, хотя в настоящее время себестоимость этой технологии довольно высока, направление гидрохимического обогащения или гидрохимического (синтетического) производства основных огнеупорных оксидов (MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), а также углерода видится единственной перспективой повышения химической чистоты огнеупорных материалов. Кроме того, гидрохимический способ обогащения / производства чистых огнеупорных материалов позволяет:

- еще на стадии производства дешево и контролируемо легировать их структуры, получая нужные физико-химические свойства;

- вовлекать в производство чистых материалов не только природное качественное сырье, но и техногенные отходы, решая одновременно задачи ресурсосбережения и снижения антропогенного воздействия на окружающую среду.

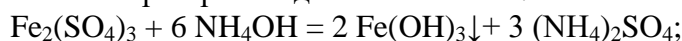
К примеру, авторами опробована технология комплексной переработки отходов производства техногенных и/или природных алюмосиликатных материалов с использованием регенерируемого выщелачивающего сернокислотного раствора – раствора гидросульфата аммония. Технология включает:

1) сернокислотное выщелачивание сырья раствором гидросульфата аммония с извлечением железа III и алюминия в раствор по следующим реакциям:

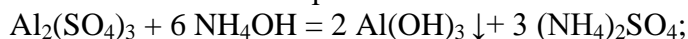


2) выделение фильтрацией кислотостойкого остатка, содержащего оксиды  $\text{RO}_2$ ,  $\text{R}_2\text{O}_5$  для последующего использования в качестве сырья для производства строительных материалов, огнеупоров, керамики, абразивов и т. п.;

3) осаждение железа III из раствора аммиаком и отделение гидроксида железа III для дальнейшего использования при производстве пигментов:



4) осаждение алюминия из раствора аммиаком и отделение гидроксида алюминия для дальнейшего использования в качестве сырья:



5) получение чистого раствора сульфата аммония из которого выделяется кристаллический сульфат аммония; который по разработанной, апробированной на опытной промышленной установке технологии термически разлагается на гидросульфат аммония и аммиак по реакции



б) возврат полученных сульфата аммония и аммиака в производство.

Сырьем для исследования были выбраны отходы получения каолина месторождения Журавлиный Лог (г. Пласт, Челябинская обл.) и каолин-сырец Полетаевского месторождения (г. Челябинск). Фазовый состав исходных материалов включает, мас. %: каолинит  $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$  – 95,0–97,0; кварц  $\text{SiO}_2$  – 1,0–2,0 и полевых шпатов (микроклин  $\text{K}$ ,  $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ ) – 1,0–3,0.

Предлагаемая технология гидрохимической переработки, позволяющая улучшить вскрытие исходного сырья и увеличить выход целевого продукта, состоит из:

- предварительного помола сырья до полного прохода через сито 0,08 мм;

- подготовки раствора технической  $\text{H}_2\text{SO}_4$  с содержанием: 10, 15 и 20 %;

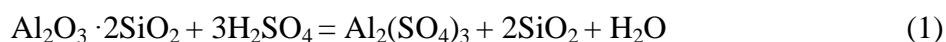
- гранулирования помолотого сырья с добавлением раствора  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ;

- классификации полученных гранул с выделением фракции 3–7 мм и возвращение остальных фракций на стадию гранулирования.

Термообработки полученных гранул при температуре 350–600 °С.

Фазовый состав гранулированных продуктов после термообработки при 350 (и 600) °С представлены, мас. %: метакаолинит  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  – 85,0–94,0 (14,0–66,0); кварц  $\text{SiO}_2$  – 1,0–2,0 (13,0–33,0); гидрослюды  $\text{Na}, \text{K}, \text{Al}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$  – 3,0–14,0 (43,0–58,0) и сульфатом алюминия 0,0–2,0 (15,0–23,0). Установлено, что в процессе термообработки наибольшему изменению подвергаются материалы, гранулированные с 20-% раствором серной кислоты и термообработанные при температуре не менее 500 °С, при в продуктах образуется имеющий скрытокристаллическое, почти аморфное строение метакаолинит  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ .

Процесс выщелачивания целевых продуктов происходит по реакции



в режиме медленного кипения (5–7 мин) и естественного остывания раствора (50–60 мин) с дальнейшей декантацией и промывкой осадка. Промывные воды собираются и направляются на получение выщелачивающего раствора. Результаты процесса выщелачивания представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты процесса выщелачивания

№ п/п		1	2	3	4	5	6		
Процесс		Выщелачивание							
Реагенты, г	Метакаолинит	10 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3	–	3	–			
		15 % H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	–	3	–	300	450	500	
	25 % р-р серной кислоты		17,5			1748	1966	2185	
Условия	Т <sub>кип.</sub> , °С		–			90			
	Т <sub>кип.</sub> , мин		50	90		50	60	90	
	Избыток р-ра H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , %		10 %						
	Δ Т <sub>суш.</sub> , °С		207	212	258	212	306	297	
	Т <sub>суш.</sub> , мин		40	71	110	71	104	120	
Метод фильтрования		Декантация							
Масса отстоявшихся вод (маточники), г		375,6	308,9	301	1137	1949	3818		
Масса нерастворенного осадка, г	Практическая		1,63	1,73	1,77	481	335	303	
	Теоретическая		1,62	1,62	1,62	270	270	270	
Выход продукта (осадка), %		109	116	110	178	124	112		
Дополнительно		рН <sub>нач/кон</sub>		0,02/0,51	0,25/0,63	/0,75	/1,06	/094	/1,39

По результатам выщелачивания можно сделать вывод, что лучше всего выщелачивание проходит при использовании в качестве выщелачивающего агента 15 % раствора H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Таблица 2  
Результаты осаждения

№ п/п		1	2	3	4	5	6	7	8
Реагенты, г	р-р Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	588	250	500	500	100			
	р-р NH <sub>4</sub> OH	–	146	268	278	431	548	915	670
	10 % р-р NH <sub>4</sub> NaSO <sub>3</sub>	520	520	1040	1210	2420	2420	1815	1815
Избыток 10% р-р NH <sub>4</sub> NaSO <sub>3</sub>		1,5			2		1,5		
Т <sub>кип.</sub> , °С		82						74	
Т <sub>кип.</sub> , мин		120							
Δ Т <sub>суш.</sub> , °С		127 - 278	162- 347	166- 296	204- 343	194- 289	193- 320	201- 315	199- 321
Т <sub>суш.</sub> , мин		124	235	189	180	199	201	200	198
Метод фильтрования		Декантация							
Продукт		Al(OH) <sub>3</sub>							
Масса отстоявшихся вод (маточник), г		–	680	–	–	–	–	–	–
Масса осадка фактическая, г		14	13	33	41	38	140	–	–
Масса осадка теоретическая, г		13	13	26	26	26	52	–	–
Выход продукта, г		108	100	127	158	146	269	–	–
рН после добавления аммиака технического		–	4,15	4	–	–	–	–	3,7
рН маточного раствора		–	5,66	–	–	–	–	4,01	–

Процесс осаждения из очищенного от оксидов железа раствора сульфата алюминия производилась при температуре раствора 20–60 °С покапельным введением раствора NH<sub>4</sub>OH в соотношении 1 : 2 с контролем рН раствора через каждые 5–10 мин до конечной рН раствора 4,0 – табл. 2. После осаждения производится отстаивание осадка, его

декантация и промывка. Сушку и термообработку гидроксида проводили в лабораторных печах при температуре 400–550 °С до прекращения потери массы. Полученный продукт содержит, мас. %: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 99,2; R<sub>2</sub>O – 0,14; RO – 0,01; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 0,05; SiO<sub>2</sub> – 0,08. Удельная поверхность материала составила 5680 м<sup>2</sup>/г, средний размер частиц – 2,7 мкм.

#### Библиографический список

1. Бааске, А. Огнеупорные материалы: разработки, тенденции, доступность / А. Бааске, Д. Дюберс, Р. Фандрих [и др.] // Черные металлы. – 2011. – № 9. – С. 32–39.
2. Смирнов, А. Н. Основные тенденции развития рынка огнеупорных материалов / А. Н. Смирнов. – Режим доступа: <http://steellab.com.ua/news/2014/01/01.php>.
3. Аксельрод, Л. М. Черная металлургия, огнеупорные материалы. Реальность и прогнозы / Л. М. Аксельрод // Новые огнеупоры. – 2017. – № 11. – С. 3–13.
4. Visloguzova, É. A. Analysis of the effect of periclase-carbon refractory quality on converter lining life / É. A. Visloguzova, I. D. Kashcheev, K. G. Zemlyanoy // Refractories and Industrial Ceramics. – 2013. – V. 54. – № 2. – P. 83–87.
5. Goto, K. Progress and Perspective of Refractory Technology / K. Goto, S. Hanagari, K. Kohno, T. Matsui, T. Ikemoto // Nippon steel technical report. – 2013. – № 104. – P. 21–25.
6. Poirier, J. A review: influence of refractories on steelquality / J. Poirier // Metall. Res. Technol. – 2015. – V. 112. – № 4. – 20 p.
7. Смирнов, А. Н. Основные тенденции развития рынка огнеупорных материалов / А. Н. Смирнов. – Режим доступа: <http://steellab.com.ua/news/2014/01/01.php>.
8. Shand, M. A. The chemistry and technology of magnesia / M. A. Shand // John Wiley&Sons, Inc. 2006. – 263 p.
9. Kramer, D. A. Minerals Year Book 2002. Magnesium Compounds. USGS, Reston. Virginia, 2002.
10. Кащеев, И. Д. Новые возможности кислотного способа получения оксида алюминия / И. Д. Кащеев, К. Г. Земляной, А. В. Доронин, Е. Ю. Козловских // Новые огнеупоры. – 2014. – № 4. – С. 6–13.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ПОЛОСЫ НА КОНТАКТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И УСИЛИЕ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ

**Ильин Кирилл Владимирович,**

E-Mail: [k.v.ilin@urfu.ru](mailto:k.v.ilin@urfu.ru),

**Баранов Георгий Леонидович,**

E-Mail: [bargeleo@mail.ru](mailto:bargeleo@mail.ru),

Уральский федеральный университет,  
Институт новых материалов и технологий,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Численными методами исследовали влияния переднего и заднего натяжений на контактные напряжения и усилие при холодной прокатке полосы для металлов с различными параметрами кривой деформационного упрочнения. Получили зависимости усилия прокатки от указанных параметров и напряжений натяжения. Сравнение полученных результатов с известными, позволило оценить погрешность расчета усилия прокатки при замене дуги захвата хордой и эквивалентного предела текучести его средне-арифметическим значением. Установили, что приближение к реальной форме очага деформации, а также пошаговый учет упрочнения металла увеличивает среднее контактное напряжение и расчетное усилие прокатки. Расхождение

с существующими методиками достигает наибольших значений при расчете интенсивно упрочняющихся сталей в случае отсутствия натяжения. С ростом натяжения различие в результатах расчета по предложенной и известным методикам сокращается. Предложенная методика позволяет более точно определять усилие холодной прокатки для различных металлов в зависимости от параметров натяжения полосы. Результаты численного анализа влияния натяжения на среднее нормальное напряжение и усилие прокатки обобщены в виде зависимостей, удобных для инженерных расчетов, с погрешностью, не превышающей 5 %.

**Ключевые слова.** Холодная прокатка полосы, натяжение полосы, контактные напряжения, гипотеза плоских сечений, деформационное упрочнение, усилие прокатки.

Натяжение является одним из важных факторов, определяющих энергоемкость, усилие прокатки и контактные напряжения при холодной прокатке полосы. Известно, что нормальные контактные напряжения при прокатке полосы зависят от геометрических параметров очага деформации, механических характеристик материала заготовки, условий контактного трения, переднего и заднего натяжений полосы [1]. Холодная прокатка характеризуется низкими коэффициентами трения, а угол захвата не превышает 8 градусов, что позволяет применить гипотезу плоских сечений при анализе напряженного состояния металла [2–10].

В методике А. И. Целикова [1] при расчете контактных напряжений дуга захвата заменена хордой, и начальные натяжения полосы учитываются при помощи коэффициентов  $\xi_i$ :

$$\text{для зоны отставания: } p_A = \left( \frac{2 \cdot \tau_s}{\delta} \right) \cdot \left[ (\xi_0 \cdot \delta - 1) \cdot \left( \frac{h_0}{h_x} \right)^\delta + 1 \right]; \quad (1)$$

$$\text{для зоны опережения: } p_B = \left( \frac{2 \cdot \tau_s}{\delta} \right) \cdot \left[ (\xi_1 \cdot \delta + 1) \cdot \left( \frac{h_x}{h_1} \right)^\delta - 1 \right], \quad (2)$$

где  $\tau_s = \frac{2 \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}}$  – сопротивление чистому сдвигу;  $\sigma_s = \frac{\sigma_{s0} + \sigma_{s1}}{2}$  – среднеарифметический

предел текучести;  $\sigma_{s0}$  и  $\sigma_{s1}$  – предел текучести металла до и после обжатия;  $\delta = \mu \cdot \text{Ctg} \left( \frac{\alpha}{2} \right)$

$\mu$  – коэффициент трения;  $\alpha$  – угол захвата;  $\xi_0 = \frac{2 \cdot \tau_s - \sigma_A}{2 \cdot \tau_s}$ ;  $\xi_1 = \frac{2 \cdot \tau_s - \sigma_B}{2 \cdot \tau_s}$ ;  $\sigma_A$  и  $\sigma_B$  –

напряжения натяжения полосы на входе в очаг деформации и выходе из него;  $h_0$  – толщина полосы до обжатия;  $h_1$  – толщина полосы после обжатия;  $h_x$  – текущее значение толщины полосы.

Среднее нормальное напряжение равно:

$$p_{cp} = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l p_x \cdot dx, \quad (3)$$

где  $l$  – длина дуги захвата.

Для упрощения расчета  $p_{cp}$  предложена зависимость [1]

$$p_{cp} = \frac{1}{\Delta h} \left( \xi_0 \cdot 2 \cdot \tau_{s0} \cdot \frac{h_0}{\delta - 2} \left[ \left( \frac{h_0}{h_H} \right)^{\delta - 2} - 1 \right] + \xi_1 \cdot 2 \cdot \tau_{s1} \cdot \frac{h_1}{\delta + 2} \left[ \left( \frac{h_H}{h_1} \right)^{\delta + 2} - 1 \right] \right), \quad (4)$$

где  $\Delta h$  – величина обжатия металла;  $\tau_{s0}$  и  $\tau_{s1}$  – сопротивление чистому сдвигу до и после обжатия;  $h_H$  – толщина полосы в нейтральном сечении.

По методике У. Хессенберга и Р. Симса среднее нормальное напряжение с учетом натяжения находится по формуле

$$p_{cp} = p'_{cp} \cdot \left( 1 - 0,25 \cdot \frac{\sigma_A - \sigma_B}{\tau_s} \right), \quad (5)$$

где  $p'_{cp}$  – напряжение без учета натяжения.

А. А. Королевым была предложена следующая упрощенная формула [8]:

$$p_{cp} = p'_{cp} - 0,5 \cdot (\sigma_A + \sigma_B). \quad (6)$$

При определении среднего нормального напряжения по формулам (1)–(3) и (5)–(6), упрочнение учитывается среднеарифметическим значением сопротивления чистому сдвигу металла до и после обжатия, а дуга захвата заменена хордой, что может привести к значительной погрешности, при расчете среднего нормального напряжения [10].

Как следует из зависимостей (5)–(6), переднее и заднее натяжения одинаково влияют на усилие прокатки. Это противоречит известным экспериментальным данным, в соответствии с которыми заднее натяжение больше влияет на усилие прокатки, чем переднее [1–2]. Существующие численные методы оценки влияния натяжения на усилие прокатки относятся, как правило, к конкретным условиям процесса, что затрудняет их применение для инженерных расчетов [2, 11].

### Цель работы

Исследование влияния переднего и заднего натяжений на контактные напряжения и усилие при холодной прокатке полосы для металлов с различными параметрами деформационного упрочнения. Построение зависимости усилия прокатки от параметров натяжения и оценка погрешности расчетов при замене дуги захвата хордой и эквивалентного предела текучести среднеарифметическим значением.

В предложенной методике разбили дугу захвата хордами на множество участков, усреднив механические характеристики металла в пределах участка. Используя зависимости (1) и (2), получили рекуррентные соотношения между нормальными контактными напряжениями в начале и в конце каждого участка:

$$\text{для зоны отставания: } p_{Ai} = \left( \frac{2 \cdot \tau_{Si}}{\delta_i} \right) \cdot \left[ (\xi_{Ai} \cdot \delta_i - 1) \cdot \left( \frac{h_i}{h_{i+1}} \right)^{\delta_i} + 1 \right]; \quad (7)$$

$$\text{для зоны опережения: } p_{Bi} = \left( \frac{2 \cdot \tau_{Si}}{\delta_i} \right) \cdot \left[ (\xi_{Bi} \cdot \delta_i + 1) \cdot \left( \frac{h_{i+1}}{h_i} \right)^{\delta_i} - 1 \right], \quad (8)$$

где  $\tau_{Si} = \frac{2 \cdot \sigma_{Si}}{\sqrt{3}}$  – сопротивление чистому сдвигу на  $i$  шаге,  $\sigma_{Si} = \frac{\sigma_i + \sigma_{i+1}}{2}$  –

среднеарифметический предел текучести на  $i$  шаге;  $\sigma_i$  – предел текучести металла в начале

$i$ -го участка;  $\xi_{Ai} = \frac{2 \cdot \tau_{Si} \pm \sigma'_{Ai}}{2 \cdot \tau_{Si}}$ ;  $\sigma'_{Ai} = p_{Ai-1} - 2 \cdot \tau_{Si}$ ;  $\xi_{Bi} = \frac{2 \cdot \tau_{Si} \pm \sigma'_{Bi}}{2 \cdot \tau_{Si}}$ ;  $\sigma'_{Bi} = p_{Bi-1} - 2 \cdot \tau_{Si}$ ;

$\delta_i = \frac{\mu}{\text{tg} \varphi_i}$ ;  $\varphi_i = \alpha - \frac{(1 + 2 \cdot i') \cdot \alpha}{2 \cdot \gamma}$  – угол наклона хорды к оси прокатки на  $i$ -м участке;  $i' =$

$0 \dots i-1$ ;  $h_i$  – высота полосы в начале  $i$ -го участка;  $\gamma$  – количество участков разбиения дуги.

Высоту полосы  $h_i$  определили по формуле

$$h_i = h_1 + 2R \cdot \left( 1 - \text{Cos} \left( \frac{\alpha}{\gamma} \cdot i \right) \right),$$

где  $R$  – радиус валка;  $i$  меняется от  $\gamma$  до нуля для формулы (7) и от нуля до  $\gamma$  для формулы (8). Учет деформационного упрочнения производился по формуле

$$\sigma_{Si} = \sigma_{S0} \cdot (1 + m \cdot \varepsilon^n),$$

где  $m$  и  $n$  – коэффициенты, характеризующие кривую упрочнения  $\varepsilon = \ln\left(\frac{h_0}{h_i}\right)$  – степень деформации.

По описанной методике рассчитали нормальные контактные напряжения по формулам (7)–(8) и среднее нормальное напряжение при различных значениях переднего и заднего натяжений для стали 65Г и стали 10. Сравнили полученный результат с рассчитанными по формулам (1)–(4).

Эпюры нормальных контактных напряжений при  $R = 275$  мм;  $\mu = 0,12$ ;  $\lambda = 1,5$ ;  $h_1 = 3$  мм изображены на рис. 1–2, где эпюры 1 и 2 получены по формулам (1)–(2) и (7)–(8) соответственно, при отсутствии начального натяжения, эпюры 3 и 4 получены по указанным формулам при натяжениях  $q_0 = q_1 = 0,5$ , где  $q_0 = 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma_A}{\tau_{S0}}\right)$ ;  $q_1 = 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma_B}{\tau_{S1}}\right)$

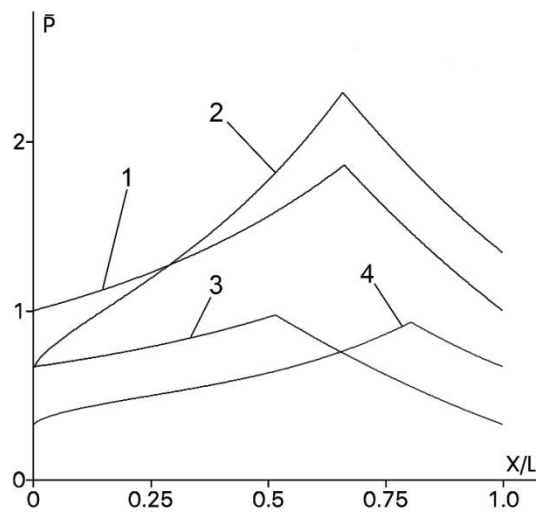


Рис. 1 Эпюры нормальных контактных напряжений для стали 10 при  $m = 1,86$  и  $n = 0,64$

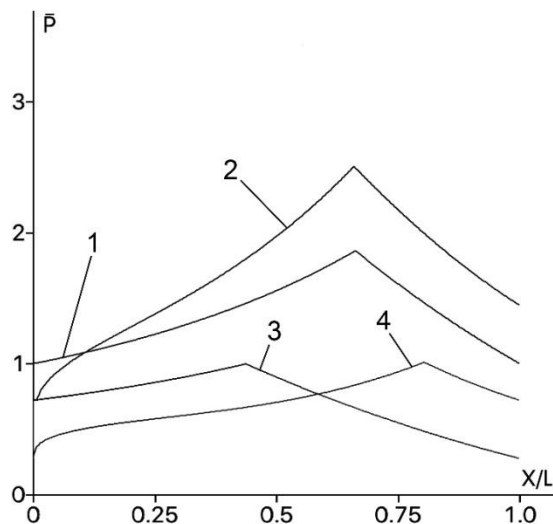


Рис. 2 Эпюры нормальных контактных напряжений для стали 65Г при  $m = 2,2$  и  $n = 0,35$

Зависимость среднего нормального напряжения от натяжения оценили коэффициентом  $\nu = \frac{p_{cp}}{P}$ . Величину  $p_{cp}$  определили по формуле (3), используя выражения (7)–(8).



Графики зависимости  $v$  от  $q_0$  и  $q_1$  для стали 65Г при указанных выше исходных данных и различных вариантах натяжения представлены на рис. 3–5. Для графика 1 производили расчет по формулам (7)–(8), для графика 2 по формулам (1)–(2) и для графика 3 по формуле (4).

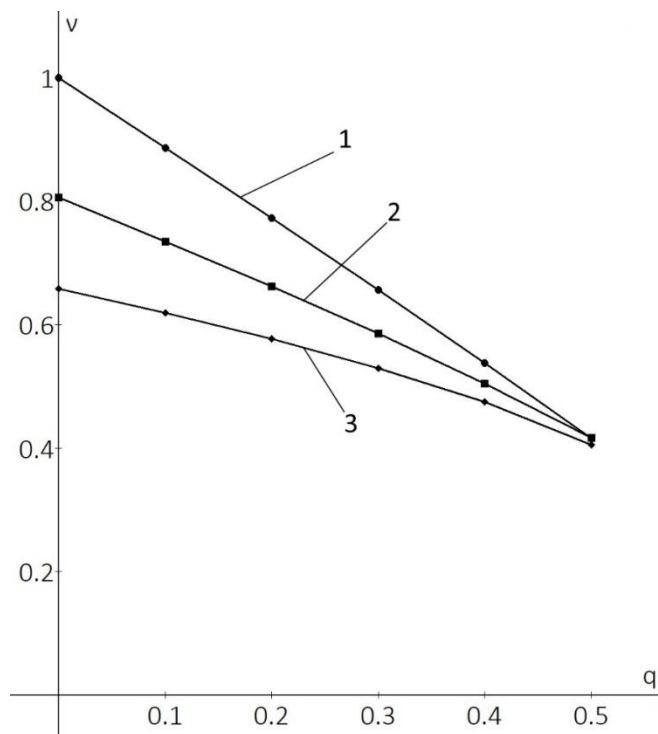


Рис. 3 Зависимость  $v$  от натяжения при  $q = q_0 = q_1$  для стали 65Г

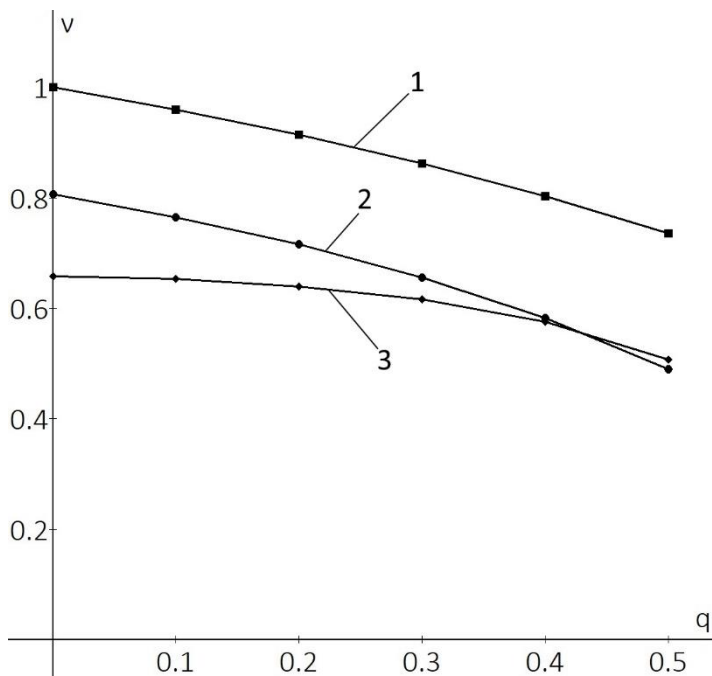


Рис. 4 Зависимость  $v$  от  $q$  при переднем натяжении для стали 65Г

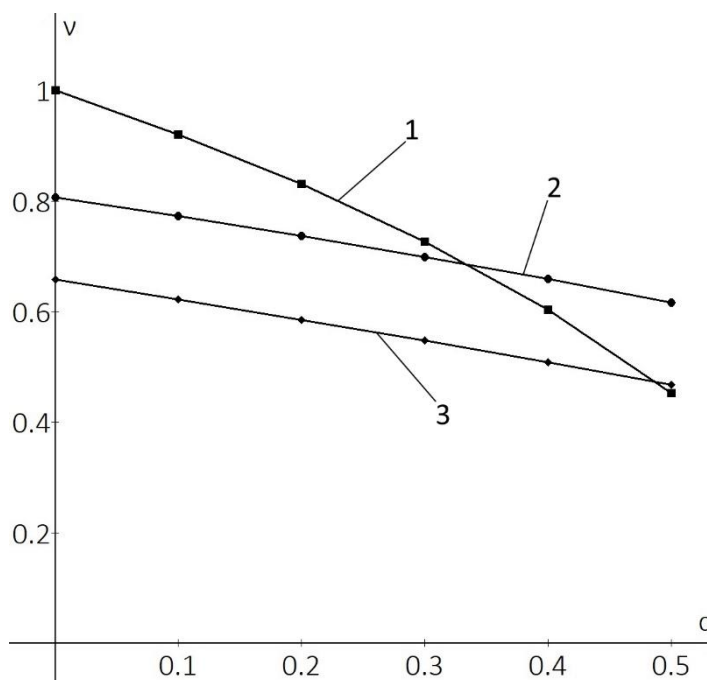


Рис. 5 Зависимость  $v$  от  $q$  при заднем натяжении для стали 65Г

Аналогичные расчеты провели для стали 10. В результате установлено, что для стали 65Г значение  $v$  при расчете по формулам (7)–(8) при отсутствии натяжения больше на 19 %, чем при расчете по формулам (1)–(2) и на 34 % чем при использовании формулы (4), для стали 10 это различие уменьшается до 10 % и 24 % соответственно. С увеличением натяжения полосы указанное различие уменьшается.

Анализ влияния параметров процесса прокатки и показателя степени кривой упрочнения  $n$  на коэффициент  $v$ , выполненный с использованием предложенной модели, показал, что  $\lambda$  в диапазоне от 1,1 до 2,5 и  $\delta$  в диапазоне от 1,6 до 6 при наличии только переднего натяжения мало влияют на  $v$  и зависимость  $v$  от  $q_1$  с погрешностью не более 5 % аппроксимируется выражением  $v = v_1 = 1 - 0,47 \cdot q_1^{1,15} \cdot n^{-0,23}$ . В случае только заднего натяжения, влиянием  $n$  на  $v$  можно пренебречь, аппроксимируя результаты расчета формулой  $v = v_0 = 1 - q_0^{1,2} \cdot \delta^{0,07}$ . При наличии переднего и заднего натяжения коэффициент  $v$  с указанной выше погрешностью аппроксимируется формулой

$$v = v_0 - (1 - v_1) \cdot (1 - 1,5 \cdot q_0).$$

Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с известными экспериментальными данными [1–2, 12] и позволяют точнее учитывать влияние натяжения на усилие прокатки полосы.

### Выводы

Выполнено исследование влияния переднего и заднего натяжений на контактные напряжения и среднее нормальное напряжение при холодной прокатке металла, построены зависимости усилия прокатки от параметров натяжения, выполнено сопоставление полученных результатов с известными. Приближение к реальной форме очага деформации, а также пошаговый учет упрочнения металла увеличивает среднее контактное напряжение и расчетное усилие прокатки. Наибольшее расхождение с существующими методиками достигает 34 % при расчете интенсивно упрочняющихся сталей в случае отсутствия натяжения. С ростом натяжения различие в результатах расчета по предложенной и известным методикам сокращается. Результаты численного анализа влияния натяжения на усилие прокатки обобщены в виде удобных для инженерных расчетов аппроксимирующих зависимостей.

## Библиографический список

1. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – Москва : Metallurgy, 1980. – 320 с.
2. Василев Я. Д. Теоретическое исследование влияния натяжения на энергетическую эффективность процесса холодной полосовой прокатки / Я. Д. Василев // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 2012. – № 6. – С. 3–5.
3. Durnev, V. D., Nastich, V. P. Influence of strip tension on the stress distribution in the deformation source in cold rolling (2000) Russian Metallurgy (Metally), (4), pp. 55–59.
4. Инатович Ю. В. Влияние натяжения полосы на режим обжатий при холодной листовой прокатке / Ю. В. Инатович, Л. В. Гареева // Производство проката. – 2018. – № 11. – С. 3–6.
5. Целиков А. И. Теория прокатки : справочник / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин [и др.]. – Москва : Metallurgy, 1982. – 335 с.
6. Никитин Г. С. Теория непрерывной продольной прокатки : учеб. пособие / Г. С. Никитин. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 399 с.
7. Третьяков А. В. Теория, расчет и исследования станов холодной прокатки / А. В. Третьяков. – Москва : Metallurgy, 1966. – 250 с.
8. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов / А. А. Королев. – Москва : Metallurgy, 1969. – 462 с.
9. Baranov G. L. Improved Calculation of the Contact Stress in Strip Rolling. Steeltranslation / 2015, Volume 45, Issue 6, pp 447–452.
10. Baranov G. L. Influence of Strain Hardening on the Force in Cold Strip Rolling. Steeltranslation / 2018, Volume 48, Issue 11, pp 739–744.
11. El-Bitar, T. A. Computer program for the calculation of roll force and torque with strip tension in cold rolling (1993) I & SM, 20(5), pp. 87–96.
12. Чернов П. П. Влияние режимов межклетевого натяжения на удельный расход энергии при тонколистовой прокатке / П. П. Чернов, Ю. А. Мухин, К. В. Бахаев // Труды Конгресса прокатчиков. – Липецк, 2005. – С. 186–190.

## ПРИДАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 30ХЗМФ ЗА СЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

**Исагулов Аристотель Зейнуллинович,  
Квон Светлана Сергеевна,  
Куликов Виталий Юрьевич,  
Щербакова Елена Петровна,**

E-Mail: sherbakova\_1984@mail.ru,

Карагандинский государственный технический университет,  
Караганда, Казахстан

**Аннотация.** В статье целью настоящего исследования была корректировка состава износостойкого чугуна с целью повышения ударной вязкости при сохранении высокой твердости и износостойкости. В качестве базового сплава был выбран износостойкий чугун марки ИХЧ 28, как наиболее популярный для производства мелющих шаров. Также описана микроструктура чугуна ИХЧ 28. На основании полученных данных можно сделать вывод, что опытный сплав при сохранении высоких прочностных

и износостойких свойств обладает более высокой ударной вязкостью. Последнее обстоятельство обусловлено более однородной структурой и меньшей разориентацией карбидной фазы по отношению к матрице. Это снижает уровень напряжений структуры, что обеспечивает повышенную стойкость к ударным нагрузкам.

**Ключевые слова.** Чугун, ударная вязкость, сплав, износостойкость, микроструктура, твердость.

Металлургический сектор наряду с нефтегазовой отраслью занимает ключевые позиции в экономике Казахстана. Одним из первых этапов металлургической индустрии является добыча и подготовка сырьевых материалов для последующей обработки. Эффективность этой стадии определяет всю последующую технологическую цепочку и, в итоге, себестоимость продукции в целом. Очевидно, что добыча и обработка сырьевых материалов (в частности, руды) зависят от стойкости и долговечности оборудования, которые в свою очередь зависят от свойств материала.

Износостойкие материалы, наряду с антикоррозионными и жаростойкими, имеют наибольшее распространение среди машиностроительных материалов, используемых в металлургической индустрии. Это связано с особенностями технологических процессов и условий эксплуатации деталей – высокие температуры, истирающие и ударные нагрузки, агрессивная среда.

Ранее был предложен состав износостойкого чугуна с повышенным содержанием никеля и более низким содержанием хрома [1–2]. Лабораторные испытания и опытная плавка на производственной площадке ТОО «Марганец» (Караганда) показали, что данный сплав обладает высокой твердостью, износостойкостью и хорошей ударной вязкостью за счет формирования структуры: вязкая матрица с равномерно распределенными твердыми включениями карбидной фазы типа (Cr, Mn, Fe) C и TiC. Предложенный состав чугуна можно рекомендовать в качестве альтернативы материала для производства литых помольных шаров.

Одним из существующих трендов в области развития износостойких материалов является совершенствование состава и свойств сплава на базе улучшаемых сталей [4–6]. Это обстоятельство обусловлено тем фактом, что доминирующее положение в этом секторе рынка занимает сталь *Hardox* различных марок (Швеция), которая отличается чрезвычайно высокими износостойкими свойствами. Высокий уровень свойств достигается в первую очередь за счет чистоты шихтовых материалов, сбалансированного состава и правильной термообработки. Стоимость этой стали достаточно высока, кроме того ее нерентабельно использовать в качестве материала для производства деталей методом литья. Эти факторы и обуславливают поиск сталей – аналогов, сопоставимых после дополнительной обработки со свойствами эталона.

Научное обоснование использования улучшаемых сталей в качестве износостойких материалов основано на принципе Шарпи. Согласно этому принципу структура износостойких материалов должна состоять из прочной, твердой, но достаточно вязкой матрицы с равномерно расположенными твердыми включениями, желательной сфероидальной формы. В структуре улучшаемых сталей такой матрицей выступает легированный  $\alpha$  – раствор, а твердыми включениями – карбиды и другие возможные фазы внедрения.

В ранее проведенных исследованиях в качестве аналога рассматривалась сталь 30XH2MA, раскисленная ферросиликобором [7]. Результаты проведенных экспериментов показали, что состав и свойства стали 30XH2MA после раскисления ферросиликобором близки к составу и свойствам стали *Hardox* за счет введения в состав микроколичеств бора.

Другим аналогом можно рассмотреть сталь 30X3МФ, которая применяется для изготовления деталей дизелей, обладает износостойкими свойствами и теплоустойчивостью до 450 °С. По сравнению со сталью *Hardox* сталь 30X3МФ имеет

более высокое содержание хрома и не содержит бор. Однако в составе стали 30X3MФ присутствует ванадий, образующий твердые и стойкие карбиды по типу MeC; кроме того, присутствие ванадия способствует измельчению зерна, что дополнительно упрочняет структуру. Учитывая эти особенности влияния ванадия, можно предположить, что присутствие ванадия в составе компенсирует отсутствие бора.

Недостатком стали 30X3MФ в этом аспекте также является пониженное содержание в составе никеля и марганца, которые играют важную роль в формировании свойств сплава. Никель не образует карбиды и, следовательно, не влияет на твердость, но при этом повышает ударную вязкость матрицы и частично понижает температурный порог хладноломкости. Марганец образует карбиды цементитного типа, упрочняя матрицу. Таким образом, присутствие никеля и марганца в составе стали в данном количестве (0,5–0,7 % и 1,5–1,7 % соответственно) является необходимым, т. к. эти элементы формируют свойства матрицы сплава.

Также проводятся исследования [7–9], где предлагается использовать в качестве износостойких материалов низко- и среднеуглеродистые стали, микролегированные сильными карбидообразователями, типа ванадия и ниобия. Микролегирование элементами типа ванадия, титана и ниобия способствует измельчению зерна, образованию стойких карбидов по типу MeC, повышению твердости и износостойкости. Введение добавок в микроколичествах (суммарное содержание ванадия, ниобия и титана не превышает 0,1 %) практически не влияет на себестоимость сталей при значительном улучшении их свойств.

Исследовалась возможность придания износостойких свойств стали 30X3MФ посредством корректировки состава за счет дополнительного легирования.

Легирование осуществлялось ферроникелем марки FeNi20LC, раскисляли сплав с помощью ферромарганца марки ФМн90 (ГОСТ 4765–91). Предварительно с целью полного расплавления ферросплавы измельчали (фракция 200 мкм) при содержании данной фракции не менее 70 %. Для плавки использовали лабораторную печь УИП-25, вес плавки составлял 3,0 кг. В качестве основы использовали сталь 30X3MФ, за 15 мин до окончания плавки вводился ферроникель, за 5 мин до разлива раскисляли ферромарганцем. По окончании плавки и полного охлаждения был проведен химический анализ выплавленного сплава на спектрометре *Polyspec*. Результаты представлены в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, содержание таких элементов, как Si, Mn, Ni после предлагаемой обработки достигает содержания этих элементов в эталоне. Отсутствие бора в составе образца 3 компенсируется повышенным содержанием хрома и присутствием ванадия. Недостатком полученного сплава является пониженное содержание молибдена по сравнению с эталоном, что надо учитывать при назначении режима термообработки, т. к. молибден препятствует развитию отпускной хрупкости.

Из опытной плавки были подготовлены образцы для термообработки. Классическим режимом термообработки стали 30X3MФ является закалка с 870 °С в масле с последующим отпуском 620 °С в воде. В связи с тем, что состав стали изменился, соответственно, должен измениться режим термообработки.

Таблица 1  
Химический состав образцов

Номер образца	Элемент, %	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	B	V
	образец										
1	<i>Hardox 500</i> (эталон)	0,27–0,35	0,7	1,6	0,6	0,025	0,025	1	0,6	0,003–0,004	–
2	30X3MФ без легирования	0,28	0,35	0,5	0,2	0,02	0,02	2,5	0,3	–	0,12
3	30X3MФ после легирования	0,32	0,6	1,7	0,55	0,025	0,025	2,3	0,28	–	0,1

В связи с увеличением содержания углерода и марганца, образующего карбиды цементитного типа, целесообразно несколько увеличить температуру закалки. При назначении режима термообработки необходимо также помнить, что сталь 30X3МФ склонна к отпускной хрупкости II рода. Увеличение содержания Si и Mn в комбинации Cr-Mn-Si, как в данном случае, повышает эту склонность. Благоприятным фактором в борьбе с отпускной хрупкостью является присутствие Mo, хотя его наличие меньше, чем в эталоне.

Для предотвращения развития отпускной хрупкости были рассмотрены следующие режимы термообработки: закалка с 890 °С в масле с последующим отпуском в интервале 450–550 °С, охлаждение в холодной воде. Выбор более низкой температуры отпуска обусловлен стремлением избежать интервала отпускной хрупкости и повысить прочностные свойства матрицы.

Необходимую вязкость матрицы должно обеспечить повышенное содержание Ni в скорректированном составе.

Мелющие шары являются необходимым элементом оборудования для измельчения и дробления руд. На казахстанском рынке представлены, в основном, литые мелющие шары из износостойких высокохромистых чугунов марок типа ИХЧ 28, т. к. их стоимость значительно ниже катаных стальных шаров. Проведенный анализ причин выхода из строя мелющих шаров [1, 2] показал, что основная причина заключается не в износе поверхности шара, а в сколах поверхности или разломе шара полностью.

Мелющие шары в процессе эксплуатации испытывают две основные нагрузки: истирающие и ударные. Следовательно, для обеспечения длительной эксплуатации шаров необходимо, чтобы они обладали высокой твердостью, прочностью, износостойкостью и достаточно хорошей ударной вязкостью для сопротивления ударным нагрузкам.

Надо сказать, что шары, производимые из высокохромистых чугунов, обладают высокими прочностными свойствами, но их ударная вязкость невысока. Это связано с тем, что структура высокохромистых чугунов представлена ледебуритом и комплексными карбидами железа и хрома типа  $Me_3C$  (рис. 1).

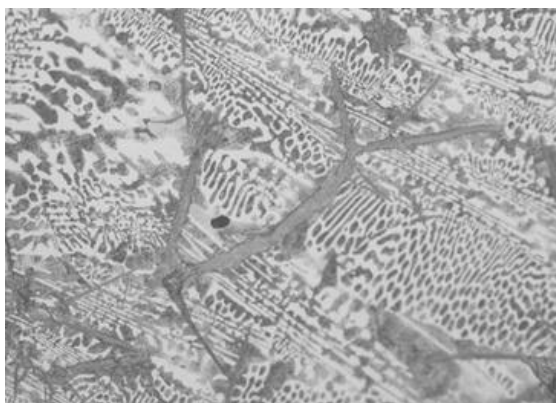


Рис. 1 Микроструктура чугуна ИХЧ 28,  $\times 500$

Структура представлена достаточно грубыми составляющими, цементитные ламели – широкие и протяженные. Структурные составляющие обладают высокой твердостью, особенно карбидная, при этом их вязкость – невысока. Ледебурит, в состав которого входит перлит, также не обладает вязкостью, т. к. его матрица – легированный  $\alpha$ -раствор обладает высокой твердостью. Согласно уравнению [3]

$$\Delta\sigma_T = \sum_{i=1}^n K_i^f C_i^f,$$

где  $K_i^f$  – коэффициент упрочнения феррита;

$C_i^f$  – концентрация  $i$ -го легирующего элемента, растворенного в феррите, прирост величины упрочнения феррита за счет легирования составит 12 390 МПа/1 %. Расчет

проводился исходя из того, что процент перехода хрома в феррит равен 30, остальной хром расходуется на образование карбидов [5]. Крупность ламелей цементита может вызывать также повышенное поле напряжений в структуре, что обусловлено высокой разориентацией границ игл цементита и ледебуритных колоний.

Целью настоящего исследования была корректировка состава износостойкого чугуна с целью повышения ударной вязкости при сохранении высокой твердости и износостойкости. В качестве базового сплава был выбран износостойкий чугун марки ИХЧ 28, как наиболее популярный для производства мелющих шаров. Проведенный анализ влияния легирующих элементов на структуру и  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращение показал, что увеличение содержания марганца и никеля приводит к стабилизации  $\gamma$ -раствора, причем никель также положительно влияет на ударную вязкость. Снижение содержания хрома в сплаве приводит к уменьшению количества хромистых карбидов, которые, собственно, обеспечивают высокую твердость.

Однако уменьшение доли хромистых карбидов можно компенсировать образованием карбидов по типу MeC. В отличие от карбидов цементитного типа карбиды MeC имеют меньшие размеры и сфероидальную форму, что уменьшает напряженность структуры и увеличивает пластичность. Для этого в сплаве следует вводить Ti, который является сильным карбидообразователем.

Структура определяется факторами, соответствующими принципу Шарпи: с относительно вязкой и прочной матрицей с твердыми включениями карбидной фазы. В такой структуре обеспечивается комплекс свойств – твердость и износостойкость при достаточной вязкости.

В проведенных экспериментальных исследованиях был выплавлен сплав следующего химического состава (табл. 2).

Таблица 2  
Химический состав опытного сплава

Элемент, %	C	Cr	Mn	Ti	Ni	Si
Опытный сплав 1	2,4	15	3,0	0,6	3,0	2,0
ИХЧ 28	2,7	28	0,8	-	1,5	0,8

Сплав разливался в песчано-глинистые формы в отливки «Мелющий шар» диаметром 80 мм. Часть шаров была подвергнута термообработке – нормализации при 900 °С. Полученные шары были промаркированы и загружены в мельницу для испытаний вместе с шарами из ИХЧ 28. Шары использовались для размол марганцевых руд месторождения Богач. Размол выполнялся в течение 14 ч, затем опытные и сравниваемые шары в количестве 50 шт. каждой партии были осмотрены. Шары проходили визуальный контроль для определения количества шаров со сколами, поколами, значительным износом (свыше 5 % от диаметра) (табл. 3).

Таблица 3  
Данные по оценке износостойкости образцов после испытания (партии из 50 шаров)

№ п/п	Образец	Образцы с поколами, шт	Образцы со сколами, шт	Образцы с поверхностным износом более 5 %, шт.
1	ИХЧ28Н2 (эталон)	3	22	9
2	Опытный сплав	8	16	11
3	Опытный сплав после т/о	6	13	13

Как видно из данных табл. 2, шары, изготовленные из опытного сплава, меньше подвергались поколам и сколам, однако количество шаров, имеющих износ поверхности более 5 %, несколько увеличился.

Изменение характера повреждений мелющих шаров вызвано в первую очередь изменением структуры сплава, обусловленного изменением состава.

На рис. 2 представлена микроструктура опытного сплава 2.

Сравнение структур образцов 2 и 1 (ИХЧ 28) показывает более грубый характер структуры сплава ИХЧ. В опытном образце ледебуритные колонии более мелкие, так же как и цементитные иглы, количество цементитных игл сокращается, но появляется новая фаза – сфероидальные карбиды типа MeC.

Таким образом, на основании полученных данных можно сделать вывод, что опытный сплав при сохранении высоких прочностных и износостойких свойств обладает более высокой ударной вязкостью. Последнее обстоятельство обусловлено более однородной структурой и меньшей разориентацией карбидной фазы по отношению к матрице. Это снижает уровень напряжений структуры, что обеспечивает повышенную стойкость к ударным нагрузкам.

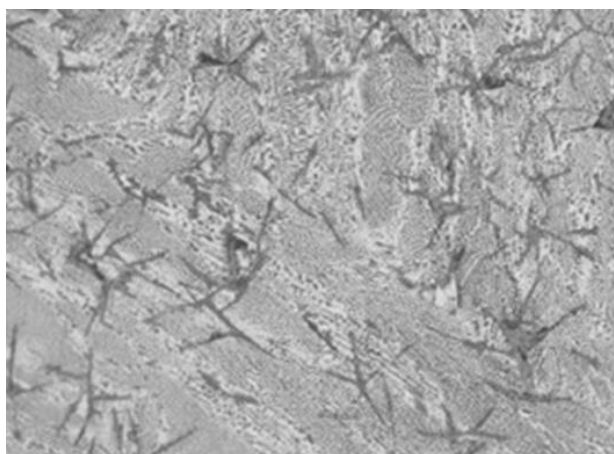


Рис. 2 Микроструктура сплава № 2,  $\times 500$

*Данные исследования проведены в рамках реализации программы Комитета науки МОН РК BR05236295 Создание, разработка и внедрение технологий производства и обработки износостойких материалов нового поколения для получения деталей металлургических агрегатов.*

#### Библиографический список

1. Куликов В. Ю. Применение износостойких материалов в металлургической отрасли республики Казахстан / Д. Р. Аубакиров, С. С. Квон, А. М. Достоева, Е. П. Щербакова // Металлург. – 2018. – № 10. – С. 80–83.
2. Исагулов А. З. Исследование опытных деталей для металлургических агрегатов на износ и удар в производственных условиях / А. З. Исагулов, Св. С. Квон, В. Ю. Куликов // Металлургия: технологии, инновации, качество Труды XXI Междунар. науч.-практ. конференции. В 2 ч. / под редакцией Е. В. Протопопова. – 2019. – С. 208–213.
3. Владимиров Н. Ф. Развитие технологии производства листовых корпусных сталей / Н. Ф. Владимиров, А. Я. Голубев // Вопросы материаловедения. – 1999. – № 3 (20).
4. Орлов В. В. Разработка технологии производства конструкционных сталей для морской техники и магистральных трубопроводов, предназначенных для эксплуатации в Арктике / В. В. Орлов, В. А. Малышевский, Е. А. Хлусова, С. А. Голосиенко // Сталь. 2014. – № 9. – С. 79–88.



5. Improving production technology of tube steel grades in converter process / Kovalev P. V., Ryaboshuk S. V., Issagulov A. Z., Sultamurat I., Jironkin M. V. // *Metallurgija*. 2016. 55(4). – P. 715–718.
6. Жучков В. И. Физико-химические характеристики, получение и применение борсодержащих сплавов / В. И. Жучков, О. В. Заякин, Л. И. Леонтьев и др. // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2017. – № 7. – С. 348–354.
7. Dub A. V. Nemetallicheskiye vklyucheniya v nizkolegировannoy trubnoy stali / Barulenkova N. V., Morozova T. V., Yefimov S. V., Filatov V. N., Zinchenko S. D., Lamukhin A. M. // *Metallurg-Metallurgist*. – 2004. –4. – P. 67–73.
8. Kvon S. S. Effect of inoculant introducing on improving ingot structure / Kulikov V. Y., Shcherbakova Y. P., Arinova S. K. // *Metallurgija (Zagreb, Croatia)*. – 2019. – V. 58. – № 3–4. – P. 315–318.
9. Степанов А. И. Отработка технологии микролегирования стали бором с использованием ферросиликобора / А. И. Степанов, А. А. Бабенко, А. В. Сычев // *Металлург*. – 2014. – № 7. – С. 50–52.

## **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ФОРМУ ПРИСУТСТВИЯ ВАНАДИЯ В ШЛАКАХ**

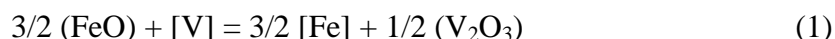
**Климов Александр Владимирович,**  
E-Mail: [a.v.klimov@urfu.ru](mailto:a.v.klimov@urfu.ru),  
Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Рассмотрена поливалентность ванадия в оксидных расплавах. Показано, что формы присутствия ванадия в шлаках определяются составом последних, а также составом металла и окислительным потенциалом газовой фазы. С использованием полимерной модели рассчитаны доли ванадия различной валентности в зависимости от технологических параметров. Расчеты показывают, что в атмосфере воздуха ванадий в шлаке должен находиться преимущественно в четырех- и трехвалентном состоянии, а при контакте с расплавом железа, в основном – в трехвалентном и, частично, в двухвалентном. При контакте с чугуном основной формой ванадия в шлаке становится VO. Основность шлака и температура оказывают существенное влияние на соотношение форм ванадия. Предложенная схема расчета с применением полимерной модели может быть полезна при выполнении соответствующих термодинамических расчетов по равновесному распределению ванадия между металлом и шлаком при производстве чугуна и стали.

**Ключевые слова.** Ванадий, шлаки, полимерная модель, чугун, сталь, термодинамические расчеты.

Термодинамические расчеты по распределению ванадия между металлом и шлаком осложняются поливалентностью ванадия, поскольку в оксидных расплавах он может присутствовать в двух-, трех-, четырех- и пятивалентной форме. Кроме того, валентность ванадия определяет не только равновесное распределение, но и кинетику его перехода между фазами. Сведения о ванадийсодержащих оксидных расплавах базируются в основном на результатах валового, минералогического и фазового анализа застывших шлаков. Очевидным является влияние состава шлака на форму существования ванадия.

Приводятся различные экспериментальные данные о влиянии состава доменных и сталеплавильных шлаков и, в частности, их основности ( $B = \text{CaO} : \text{SiO}_2$ ) на коэффициент распределения ванадия между оксидными и металлическими расплавами на основе железа. Для шлаков, образующихся при получении ванадиевых чугунов [1], с ростом основности оксидного расплава этот коэффициент уменьшается, а для железистых сталеплавильных шлаков наблюдается обратный эффект [2]. Слабая зависимость активности оксидов ванадия от основности шлаков отмечается при получении низколегированных ванадиевых сталей в электродуговых печах [3]. Четко проявляется зависимость между коэффициентом распределения ванадия и содержанием в шлаке оксидов железа при выплавке низколегированной стали в промышленных агрегатах [4, 5]. Приведенные данные указывают на трехвалентное состояние ванадия в шлаке и решающую роль реакции



в его распределении.

По данным [5, 6], значение коэффициента активности триоксида ванадия  $\gamma_{\text{V}_2\text{O}_3}$  в кислых, нейтральных и основных сталеплавильных шлаках при нормировании на чистый твердый триоксид ванадия составляет 2,6–2,8, что указывает на неизменность валентного состояния и ограниченную растворимость  $\text{V}_2\text{O}_3$  в исследованных системах.

Однако приведенные авторами данные для кислых шлаков можно линеаризовать и в координатах  $N_{\text{VO}}/a_{\text{V}} - a_{\text{FeO}}$ , что говорит о возможности присутствия значительного количества двухвалентного ванадия в кислых шлаках. При нормировании на чистый твердый VO коэффициент его активности составил 0,42 и 0,31 при 1873 и 1923 К, соответственно.

Исследование состояния ванадия и активности его оксидов в шлаковых расплавах проведено авторами [7]. Было проведено две группы исследований в печи с контролируемой атмосферой: с чистыми шлаками системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-V}_2\text{O}_5$  и данными шлаками в контакте с железоуглеродистыми расплавами различного состава. Шлаки содержали от 15 до 54 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , от 23 до 35 % CaO, от 0,6 до 52%  $\text{SiO}_2$ . Содержание ванадия составляло 0,95–2,5 мас. %. Опыты со шлаками проводили при температурах 1773–1873 К. Газовая фаза состояла из смеси CO–CO<sub>2</sub>, отношение CO : CO<sub>2</sub> меняли от 0,075 до 19, что соответствовало изменению парциального давления кислорода от  $1,5 \cdot 10^{-6}$  до  $2 \cdot 10^{-10}$  атм. Обнаружено наличие ванадия двух основных валентностей:  $\text{V}^{5+}$  и  $\text{V}^{4+}$  при  $P_{\text{O}_2}$  больше  $10^{-8}$  атм,  $\text{V}^{4+}$  и  $\text{V}^{3+}$  при  $P_{\text{O}_2} < 10^{-8}$  атм. Увеличение содержания CaO способствовало росту доли ванадия более высокой валентности, влияние  $\text{Al}_2\text{O}_3$  носило экстремальный характер, причем максимум низших валентностей наблюдался при равенстве мольных долей CaO и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . На результаты опытов могло сказаться недостаточное время выдержки для достижения равновесия и окисление ванадия в образцах шлака при отборе проб.

Опыты по катодному осаждению ванадия из оксидных расплавов на твердые электроды показали [8], что при отсутствии восстановителя и воздушной атмосфере ванадий в шлаке находится преимущественно в форме  $\text{V}^{4+}$ , а в атмосфере (CO + N<sub>2</sub>) – в форме  $\text{V}^{3+}$ . Пятивалентный ванадий в шлаке неустойчив и переходит в более низкие валентные состояния. При контакте с насыщенным по углероду расплавом железа ванадий стабилен в трехвалентном состоянии. В восстановительной атмосфере в присутствии твердого ванадия основной формой существования ванадия в шлаке является  $\text{V}^{2+}$ .

Присутствие ванадия в металлическом расплаве, вероятно, способствует протеканию на границе фаз реакции диспропорционирования



Рентгеноструктурное исследование оксидных пленок, образующихся при окислении на поверхности металла в момент достижения равновесия, показало, что при концентрации ванадия в металле менее 0,2 % образуется ванадиевая шпинель

переменного состава, а в интервале от 0,2 до 0,3 % V образуется  $V_2O_3$ . При  $[V] > 0,3$  % продуктом окисления ванадия, по мнению авторов [9], должен быть оксид  $V_2O_2$ . Несколько иные интервалы концентраций  $[V]$  найдены в работе [10]. По этим данным  $V_2O_2$  появляется при  $[V] > 0,9$  %.

Существует мнение [11, 12], что в системе Fe–V–O при низкой температуре в равновесии с металлическим расплавом могут находиться только растворы FeO–VO переменного состава. Аналогичной точки зрения придерживаются и авторы работ [13, 14], которые считают, что обнаруживаемый оксид  $V_2O_3$  появляется при охлаждении по реакции (2) с одновременным окислением V на воздухе до VO. Приведенная точка зрения основана на исследованиях продуктов раскисления железа ванадием. Однако по данным обзора [15] в зависимости от отношения O/V в металле продуктами раскисления являются  $V_2O_5$  ( $[V] < 0,1-0,2$  %),  $V_2O_3$  (при содержаниях  $[V]$  от 0,15–1,8 до 10 %) и VO (от 0,3–4 до 10 % V в металле).

Присутствие в чугуне таких сильных восстановителей как углерод и кремний приводит к восстановлению ионов переходных металлов в оксидных расплавах, особенно с большим содержанием  $SiO_2$ , до двухвалентного состояния [16]. Данное утверждение подтверждается лабораторными данными по выплавке ванадийсодержащего чугуна (рис. 1). Равновесие между металлом и шлаком по ванадию хорошо описывается реакцией (3).

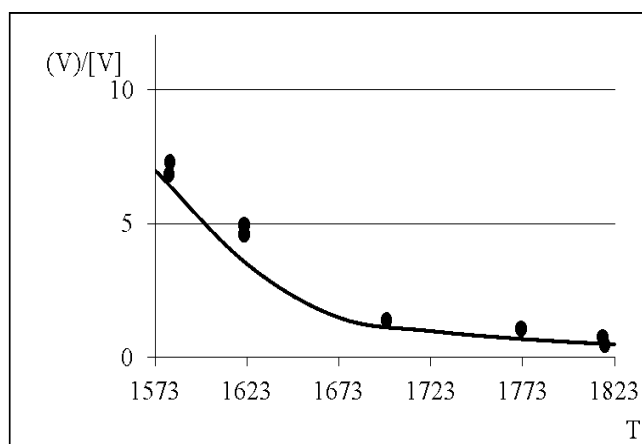
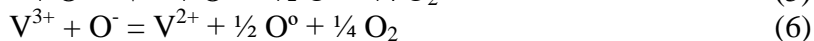
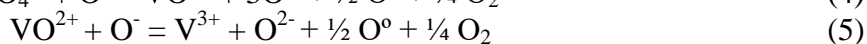
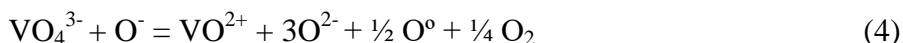


Рис. 1 Распределение ванадия между металлом и шлаком при плавке ванадиевого чугуна. Точки – опытные значения. Кривая – расчет по уравнению (3)

Таким образом, до сих пор нет четкого представления о том, как различные технологические параметры влияют на форму ванадия в шлаке, что затрудняет выбор оптимальных условий технологического процесса расчетным путем.

Оценить влияние состава шлака на распределение ванадия по валентностям позволяет полимерная модель [17]. Будем считать, что четырехвалентный ванадий присутствует в расплаве в форме катиона  $VO^{2+}$ , а пятивалентный – в форме аниона  $VO_4^{3-}$  [18].

Тогда перераспределение валентностей ванадия в оксидных расплавах можно описать уравнениями:



Здесь  $O^-$  – концевой ион кислорода,  $O^{2-}$  – свободный кислород шлака,  $O^0$  – мостиковый атом кислорода в шлаке. Предложенная запись учитывает зависимость валентных форм ванадия от парциального давления кислорода, а также, по крайней мере,

качественно, передает связь валентности форм с составом оксидного расплава. Взаимосвязь между различными формами кислорода в шлаке определяется реакцией



Модель позволяет определить ионные доли различных форм кислорода в шлаках различного состава и использовать их при расчете.

Из уравнений (4)–(6) следует, что

$$\frac{a_{VO^{2+}}}{a_{VO_4^{3-}}} = K_4 \frac{a_{O^-}}{a_{O^{2-}}^3 \cdot a_{O^0}^{1/2} \cdot P_{O_2}^{1/4}} \quad (8)$$

$$\frac{a_{V^{3+}}}{a_{VO^{2+}}} = K_5 \frac{a_{O^-}}{a_{O^{2-}} \cdot a_{O^0}^{1/2} \cdot P_{O_2}^{1/4}} \quad (9)$$

$$\frac{a_{V^{2+}}}{a_{V^{3+}}} = K_6 \frac{a_{O^-}}{a_{O^0}^{1/2} \cdot P_{O_2}^{1/4}} \quad (10)$$

Из-за отсутствия достоверных данных по коэффициентам активности ванадия в шлаках приравниваем его активности мольным долям. Примем условно, что в подсистеме ванадия

$$N_V^{5+} + N_V^{4+} + N_V^{3+} + N_V^{2+} = 1. \quad (11)$$

Тогда из решения совместно уравнений (8)–(11), можно найти доли всех валентных форм ванадия в зависимости от состава шлака и окислительного потенциала газовой фазы.

На рис. 2 представлены рассчитанные зависимости распределения ванадия по валентностям в шлаке системы CaO–SiO<sub>2</sub> при 1600 °С. Считали, что концентрации оксидов ванадия в шлаке недостаточны, чтобы оказывать влияние на распределение кислорода по трем формам. Реакции (4)–(6) представляют собой совокупность реакций (7) и (12)–(13):

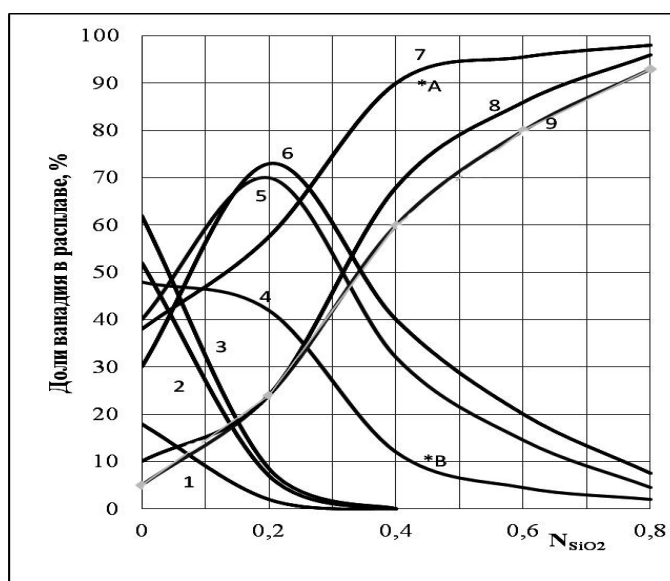


Рис. 2 Зависимость долей пяти- (1–3), четырех- (4–6) и трехвалентного (7–9) ванадия от содержания SiO<sub>2</sub> в расплаве CaO–SiO<sub>2</sub> при температуре 1600 °С и парциальном давлении кислорода 0,001 (1, 4, 7), 0,21 (2, 5, 8) и 1,0 атм. (3, 6, 9).

А и В – опытные значения долей трех- и четырехвалентного ванадия при P<sub>O<sub>2</sub></sub> = 0,001 атм.

Значения  $K_4$ –  $K_6$  находили по известным значениям  $K_7$ , которая является константой полимеризации  $K_p$ , и  $K_{12}$  –  $K_{14}$ . Последние рассчитывали по данным [19].

На рис. 2 видно, что в силикатных расплавах системы CaO–SiO<sub>2</sub> основными формами ванадия являются трех- и четырехвалентная. Заметные включения пентавалентного ванадия присутствуют при мольной доле SiO<sub>2</sub> меньше 0,3. Доля двухвалентного ванадия даже при  $P_{O_2} = 0,001$  атм. меняется от 0,066 до  $7,75 \cdot 10^{-4}$  %, а при  $P_{O_2} = 1$  атм., составляет  $3,20 \cdot 10^{-3}$ – $6,49 \cdot 10^{-5}$  %. Доля четырехвалентного ванадия меняется через максимум на уровне 50–75 %, положение которого на диаграмме зависит от внешнего давления кислорода. В шлаках с основностью 0,93 и ниже наибольшую долю составляет ион  $V^{3+}$ . Устойчивое существование трех- и четырехвалентного ванадия при очень близких значениях концентраций к расчетным подтверждено экспериментально для атмосферы аргона с примесью кислорода 0,001 атм. (см. рис. 2, точки А и В).

Чтобы распространить предложенный подход на другие оксидные системы оценили влияние концентрации свободного кислорода в шлаке на валентные формы ванадия. Данный параметр может быть получен с помощью полимерной модели для большинства металлургических систем, для которых известны константы полимеризации. Кроме того, авторы [20] предложили в качестве показателя основности шлаков использовать  $\lg$  отношения ионной доли свободного кислорода к константе полимеризации для данного состава шлака. Авторами было показано, что этот показатель играет такую же роль, как  $pH$  в водных растворах. Зависимость долей ванадия от показателя основности в атмосфере воздуха показана на рис. 3.

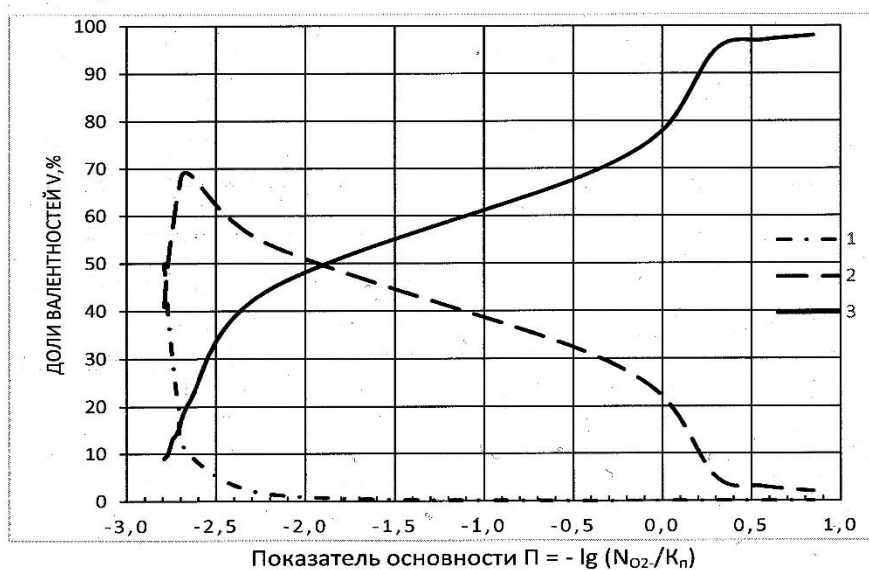


Рис.3 Зависимость соотношения форм ванадия в шлаке от показателя основности в атмосфере воздуха:  
1 – пятивалентный; 2 – четырехвалентный; 3 – трехвалентный

Проведение аналогичных расчетов с использованием в качестве реагентов металлического железа и FeO показало (рис. 4), что в шлаке, контактирующем с расплавленным железом в атмосфере воздуха, практически исчезает пятивалентный ванадий, и сильно снижается доля четырехвалентного. В то же время появляется заметное количество двухвалентного ванадия, которое растет при снижении основности.

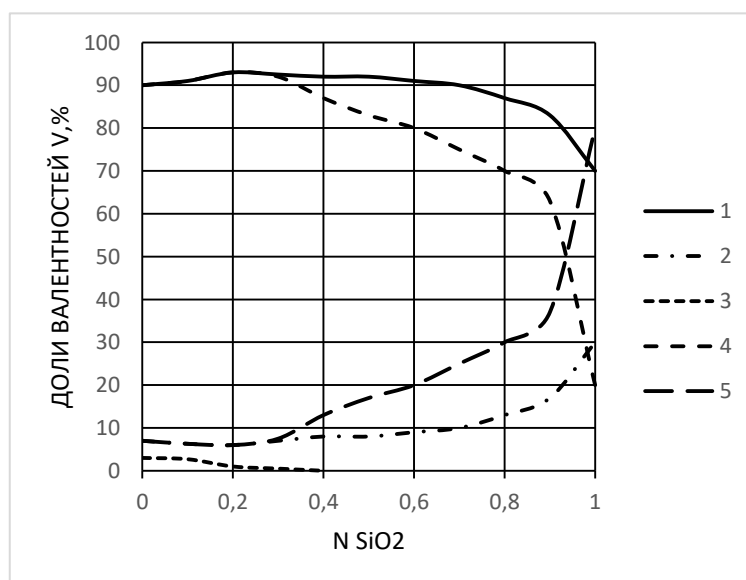


Рис. 4 Соотношение различных валентных форм ванадия в системах Fe-CaO-SiO<sub>2</sub> (1, 2, 3) и Fe-FeO-SiO<sub>2</sub> (3, 4, 5) при 1600 °C в атмосфере воздуха  
1, 4 – V<sup>3+</sup>, 2, 5 – V<sup>2+</sup>, 3 – V<sup>4+</sup>

При контакте с расплавом чугуна, как было показано ранее (см. рис. 1), двухвалентная форма ванадия, по-видимому, становится преобладающей.

Таким образом, полимерная модель предоставляет эффективный инструмент для оценки преимущественных валентных форм ванадия в шлаках в зависимости от условий протекания технологического процесса.

#### Библиографический список

1. Резниченко В. А. Титаномагнетиты, месторождения, металлургия, химическая технология / В. А. Резниченко, Л. И. Шабалин. – Москва : Наука, 1986. – 156 с.
2. Крамаров А. Д. Производство стали в электропечах / А. Д. Крамаров. – Москва : Металлургия, 1964. – 201 с.
3. Ровнушкин В. А. Закономерности прямого легирования стали ванадием / В. А. Ровнушкин, Г. А. Топорищев, Ф. С. Раковский // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1979. – 10. – С. 11.
4. Производство и использование ванадиевых шлаков / Л. А. Смирнов, Ю. А. Дерябин, А. А. Филиппенков. – Москва : Металлургия, 1985. – 126 с.
5. Бескоксовая переработка титаномагнетитовых руд / В. А. Ровнушкин, Б. А. Боковиков, С. Г. Брагчиков. – Москва : Металлургия, 1988. – 247 с.
6. Жирнова Л. Б. Взаимодействие ванадиевого шлака со сплавами на основе железа : Автореф. дис... канд. техн. наук. – Свердловск, 1983. – 22 с.
7. Ровнушкин В. А. Состояние ванадия и активность его оксидов в шлаковых расплавах / В. А. Ровнушкин, С. В. Никифоров, Г. А. Топорищев // Металлы. – 1989. – 5. – С. 5–11.
8. Климов А. В. Катодное восстановление ванадия из алюмосиликатных расплавов / А. В. Климов // Физико-химические исследования металлургических процессов. Межвузовский сборник. Вып. 11. – Свердловск : Изд. УПИ им. С. М. Кирова, 1983. – С. 112–116.
9. Anderson J. S., Khan A. S. Phase equilibria in the vanadium-oxygen system // Less-Common Metals. – 1970. – 2. – P. 209–218.
10. A. Casalot. Localisation électronique clans les oxydes V<sub>n</sub>O<sub>2n+1</sub> // Mater. Res. Bull. – 1972. – 9. – С. 903–912.

11. Михайлов Г. Г. К термодинамике реакций, протекающих при взаимодействии ванадия и кислорода, растворенных в жидком железе / Г. Г. Михайлов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1974. – 10. – С. 5–7.
12. Михайлов Г. Г. К вопросу о фазовых равновесиях в низкокислородной области системы Fe-V-O / Г. Г. Михайлов, Т. В. Лушникова // Сб. науч. тр. ЧПИ. – 1974. – 147. – С. 10–15.
13. Карасев Р. А. Раскислительная способность ванадия. Растворимость и активность кислорода в расплавах железа и ванадия / Р. А. Карасев, А. Ю. Поляков, А. И. Самарин // Изв. АН СССР ОТН. – 1952. – 6. – С. 1313–1316.
14. Нарита К. Раскислительная способность ванадия, ниобия и титана в жидком железе / К. Нарита, Ш. Каяма // Физико-химические основы производства стали. – Москва : Наука, 1971. – С. 26–32.
15. Janke D., Fisher W.A. Wirkungsparameter eox von Begleit und Legierungselementen in Stahlschmelzen // Stahl und Eisen. – 1976. – 8. – P. 398–401.
16. Charlu T. V., Kleppa O. J. High temperature combustion colorimetry. Enthalpies of formation of vanadium oxides // High temperature science. – 1973. – 4. – P. 260–268.
17. Новиков В. К. Развитие полимерной модели силикатных расплавов / В. К. Новиков // Расплавы. – 1987. – Т. 1. – № 6. – С. 21–33.
18. Эллиот Д. Ф. Термохимия сталеплавильных процессов / Д. Ф. Эллиот, М. Глейзер, В. Рамакришна. – Москва : Металлургия, 1969. – 252 с.
19. Новиков В. К. Полимерная природа расплавленных шлаков : учеб. пособие / В. К. Новиков, В. Н. Невидимов. – Екатеринбург : Издательство УПИ, 2006. – 62 с.

## КИНЕТИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАНАДИЯ ИЗ ШЛАКОВ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫМ РАСПЛАВОМ

**Климов Александр Владимирович,**  
E-Mail: [a.v.klimov@urfu.ru](mailto:a.v.klimov@urfu.ru),  
Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Представлены результаты лабораторных исследований кинетики восстановления ванадия из шлаков системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  различного состава насыщенным железом углеродистым расплавом в атмосфере воздуха. Восстановление  $\text{V}_2\text{O}_3$  из шлаков, имеющих вязкость более 0,5 Па·с и содержащих менее 7,5–8,0 %  $\text{V}_2\text{O}_3$  идет в диффузионном режиме. Скорость процесса обратно пропорциональна корню квадратному из вязкости шлака. Найдено хорошее совпадение полученных данных с результатами электрохимических исследований по катодному восстановлению ванадия, что позволило вывести уравнение скорости восстановления ванадия железом углеродистым расплавом в зависимости от объемной концентрации, температуры и вязкости шлака. Результаты расчета скоростей для разных шлаков удовлетворительно согласуются с опытными значениями.

**Ключевые слова.** Ванадий, шлаки, железом углеродистый расплав, восстановление, скорость, вязкость шлаков.

Данные по существующим традиционным схемам металлургической переработки ванадийсодержащих титаномагнетитов уже достаточно полно обобщены [1, 2]. Достаточно подробно освещены процессы легирования сталей ванадием [3]. Однако постоянное совершенствование и повышение эффективности существующих технологий требует детального исследования механизмов окислительно-восстановительных реакций

с участием ванадия. Между тем физико-химические вопросы металлургии ванадия решены в значительно меньшей степени, чем технологические. В частности, ограничено число работ по кинетике восстановления ванадия железоуглеродистыми расплавами [4–8]. Из данных этих работ следует, что восстановление ванадия из промышленных шлаков имеет скорость в 4–5 раз ниже, чем из синтетических шлаков с добавками оксидов ванадия. Скорость восстановления  $V_2O_5$  вдвое выше, чем  $V_2O_3$ . Переход от воздушной атмосферы к атмосфере аргона повышает скорость восстановления в 1,5–2,0 раза.

По рассмотренным работам трудно однозначно судить о кинетике и механизме восстановления ванадия. В железистых шлаках, по-видимому, основная часть ванадия находится в трехвалентной форме и входит в шпинелидную тугоплавкую фазу, растворение которой в гомогенной части шлака может лимитировать весь процесс восстановления. Восстановление ванадия из гомогенной части шлака может определяться либо диффузией ванадия в шлаке, либо стадией анодного окисления углерода. В работах отсутствуют кинетические уравнения процесса, не выявлено влияние состава шлака и температуры на скорость восстановления.

Нами была исследована кинетика восстановления ванадия из шлаков различного состава насыщенным железоуглеродистым расплавом. Опыты проводили методом отбора проб в печи сопротивления с угольным нагревателем. Рабочее пространство печи изолировалось от нагревателя трубой из корунда, что обеспечивало воздушную атмосферу. Пробы шлака отбирали вольфрамовым стержнем и закаливали в воде. Пробы металла отсасывали кварцевым капилляром. В опытах использовали графитовые и корундовые тигли. Так как при восстановлении ванадиевых шлаков наблюдалось вспенивание расплава, то для фиксации площади контакта шлак – графит в графитовые тигли вставляли трубки из корунда. В расчет принимали видимую поверхность. При работе с корундовыми тиглями в дно цилиндрического тигля впрессовывали графитовую шайбу. Навеска чугуна, предварительно наплавленного в графитовом тигле, помещалась на подложку. Сверху загружался предварительно наплавленный ванадийсодержащий шлак, и тигель опускался в разогретую печь. Для расплавления шлака и установления опытной температуры требовалось не более 1–2 мин. После выдержки системы в течение определенного времени при заданной температуре ячейку закаливали в воде, разбивали и определяли поверхность раздела металл – шлак и анализом фаз находили изменение концентраций реагентов в ходе опыта. Температура в опытах контролировалась термопарой (ПР-30/6 или ВР-5/20).

В ходе опытов имело место совместное восстановление V, Si, Ti, а также растворение в шлаке материала тигля  $Al_2O_3$ . Поэтому на изменение концентрации в шлаке влияло изменение массы шлака за счет восстановления других элементов, а также растворения  $Al_2O_3$  в шлаке и отбора проб. Учет этих факторов и баланса плавки по всем элементам позволил вывести уравнения для оценки изменения количества соответствующих компонентов в шлаке для такого сложного коллективного процесса.

Скорость восстановления компонентов определяли, дифференцируя зависимости восстановленной массы компонентов от времени.

В таблице ниже приведены исходные составы шлаков (без добавок  $V_2O_3$ ).

За время двухчасовой выдержки ванадий из шлаков 2–9 восстанавливался почти полностью, концентрация ванадия в шлаке устанавливалась на постоянном уровне. Вблизи этой концентрации происходит замедление процесса восстановления. Для этих шлаков 5–8 было достаточно 10–30-минутной выдержки до установления постоянной концентрации ванадия. Основная часть ванадия восстанавливалась углеродом тигля, вероятно, из-за большей поверхности контакта.



Таблица

Исходные составы исследованных шлаков (масс. %), их вязкость при температурах опытов и начальные скорости восстановления V и Si

№ шлака	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\frac{CaO}{SiO_2}$	$\mu$ , Па·с	$v_v \cdot 10^7$ , моль/(см <sup>2</sup> ·с)	$v_{Si} \cdot 10^7$ , моль/(см <sup>2</sup> ·с)
1	11,9	65,9	22,2	0,181	19-44	3,2	72,0
2	28,7	49,0	22,3	0,586	1,4-1,8	10,1	43,0
3	33,6	43,8	22,6	0,767	1,2-2,0	16,1	85,0
4	38,0	40,2	21,8	0,945	0,35	24,2	85,0
5	41,2	38,1	20,7	1,081	0,55-0,82	27,4	72,0
6	40,5	30,6	28,9	1,322	0,55	40,3	55,0
7	47,9	26,1	26,0	1,835	0,26	27,4	1,4
8	49,3	21,5	29,2	2,291	0,14-0,34	32,2	2,7
9	61,6	19,0	19,4	3,242	7,0	29,8	9,6

По зависимости скорости восстановления ванадия от концентрации ванадия в чугуна (или, соответственно, в шлаке) все исследованные расплавы можно разделить на две группы. В вязких шлаках 1–4,9 ( $\mu \geq 0,5-0,6$  Па·с) скорость восстановления убывает пропорционально концентрации в металле (рис. 1), следовательно, реакция имеет первый порядок по ванадию. На прямых отмечается излом, связанный с тем, что в начальный период происходит интенсивное восстановление ванадия также твердым углеродом, идущее с постоянной скоростью. Поэтому одинаковому изменению концентрации ванадия в металле соответствует более значительное изменение содержания V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, чем при отсутствии восстановления твердым углеродом или при замедлении последнего процесса. Первый порядок реакции по ванадию, по-видимому, отражает диффузионные затруднения.

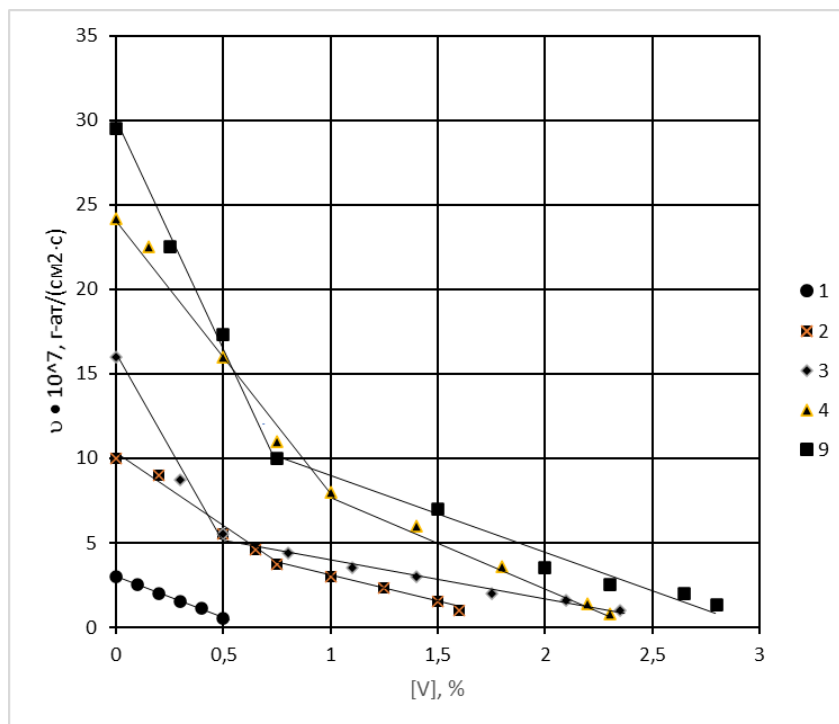


Рис. 1 Зависимость скорости восстановления ванадия из шлаков 1-4, 9 от содержания ванадия в чугуна (номера линий соответствуют номерам шлаков)

В шлаках 5–8 восстановление чугуном прекращалось после 10–30-минутной выдержки. Здесь начальные участки кривых изменения массы восстановленного ванадия от времени носят почти линейный характер, следовательно, скорость восстановления оксидов ванадия из этих шлаков слабо зависела от содержания ванадия в металле и шлаке (порядок реакции по ванадию близок к нулю). В этих шлаках, вероятно, суммарную

скорость процесса лимитировала стадия анодного окисления углерода. Но даже для этих шлаков при концентрации  $V_2O_3 \leq 1,0-1,5$  % происходило резкое замедление реакции, связанное с возникновением диффузионных затруднений.

Начальная скорость восстановления ванадия чугуном быстро увеличивается при увеличении основности шлака с 0,18 до 0,95 (табл. 1.6), затем темпы роста скорости заметно снижаются, и при основностях больше 1,1 скорость восстановления остается примерно на одном уровне. В пересчете на моль ванадия она оказалась примерно вдвое выше, чем при восстановлении углеродом тигля. Скорость восстановления кремния слабо зависит от основности в кислых шлаках, но резко уменьшается при увеличении основности шлака выше 1,3. При замедлении восстановления ванадия процесс восстановления кремния ускоряется и не достигает равновесия к моменту окончания опыта.

Для выяснения общей закономерности во влиянии состава шлака на скорость восстановления ванадия чугуном по литературным данным оценили вязкость исходных шлаков без учета добавок  $V_2O_3$ . Оказалось, что начальная скорость восстановления ванадия линейно зависит от  $\mu^{-1/2}$  (рис. 2). Данная зависимость может вытекать из диффузионного характера процесса. Как известно, скорость реакции в этом случае обратно пропорциональна толщине диффузионного слоя. Величина  $\delta$  в ходе опыта не является постоянной. Поток всплывающих со дна тигля через слой металла пузырей  $CO$  на границе металл – шлак делится на две части. Наиболее крупные пузыри переходят прямо в шлак, однако основной поток, пузырей движется в направлении меньшего сопротивления, а именно – вдоль поверхности раздела металл – шлак до стенок тигля, где собирается в крупные пузыри. Такое движение пузырей подтверждается наблюдением процесса с помощью рентгеновского интроскопа. Увлекаемые пузырями потоки металла и шлака, двигаясь относительно друг друга, уменьшают толщину диффузионного слоя, которая в этом случае обратно пропорциональна корню квадратному из скорости движения [9]. С учетом формулы Стокса можно показать, что величина диффузионного потока в этом случае обратно пропорциональна  $\mu^{1/2}$ , что и наблюдалось в опытах.

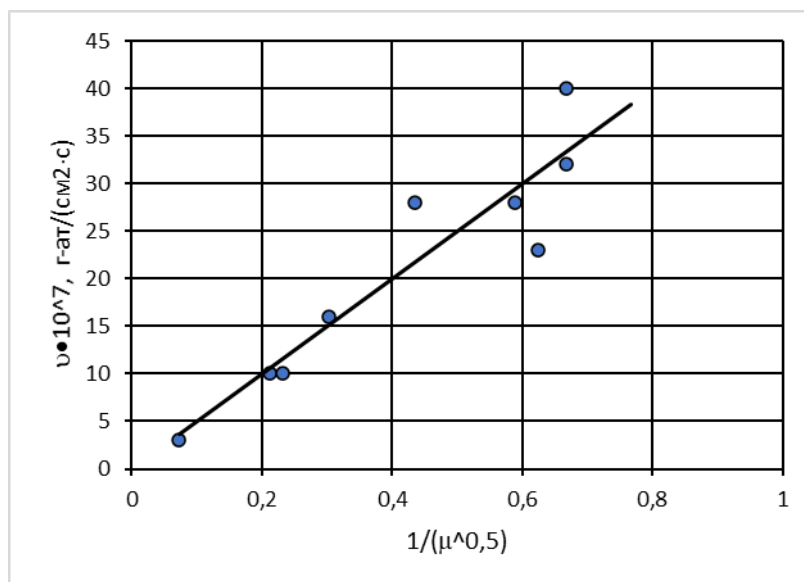


Рис. 2 Зависимость скорости восстановления ванадия чугуном от вязкости шлака

Найденную для шлака на основе (мас.%) 40CaO, 40SiO<sub>2</sub>, 20Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> скорость восстановления ванадия ( $2,42 \cdot 10^{-6}$  моль/(см<sup>2</sup>·с)), сопоставили с рассчитанной по электрохимическим данным [10, 11], с учетом температуры и фактической концентрации  $V_2O_3$  в шлаке, скоростью полуреакции



которая для температуры 1550 °С и концентрации 7,0 мас.% V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> равна 2,6·10<sup>-6</sup> моль/(см<sup>2</sup>·с). Хорошее совпадение опытных и расчетных скоростей, полученных различными независимыми методами, указывает на идентичность происходящих в обоих случаях процессов. Поэтому можно полагать, что восстановление V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> из шлаков железоуглеродистым расплавом имеет электрохимический характер и лимитируется, вероятно, диффузией ионов трехвалентного ванадия в шлаке.

В диффузионном режиме плотность катодного тока равна, А/см<sup>2</sup>

$$i = i_{\text{п}} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{nF}{RT} \eta \right) \right] \quad (2)$$

где  $i_{\text{п}}$  – предельная плотность катодного тока, А/см<sup>2</sup>;

$\eta$  – поляризация катода, В;

$F$  – число Фарадея;

$n$  – число электронов, участвующих в элементарной химической реакции (в нашем случае  $n = 3$ );

$R$  – газовая постоянная;

$T$  – температура, К.

Выражение (2) иначе можно записать в виде

$$i = \frac{D_{V^{3+}}}{\delta} \frac{3FC_V^0}{A_V} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{nF}{RT} \eta \right) \right], \quad (3)$$

где  $\frac{D_{V^{3+}}}{\delta}$  – коэффициент массопереноса V<sup>3+</sup> в шлаке, найденный ранее [10, 11];

$C_V^0$  – объемная концентрация ванадия в шлаке, г/см<sup>3</sup>;

$A_V$  – атомная масса ванадия, г/моль.

Считая анодный разряд углерода самым электроотрицательным и мало изменяющимся, выбрали поляризацию углерода ( $\eta_c$ ) за начало отсчета, тогда величину  $\eta$  можно выразить в виде

$$\eta = \eta_c - \eta_V = \frac{RT}{3F} \ln \left( \frac{K}{\Pi} \right), \quad (4)$$

где  $\frac{K}{\Pi}$  – отношение константы равновесия к произведению активностей для реакции



Комбинация уравнений (3) и (4) дает соотношение

$$i = \frac{D_{V^{3+}}}{\delta} \frac{3FC_V^0}{A_V} \left[ 1 - \left( \frac{\Pi}{K} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (6)$$

Плотность тока связана со скоростью соотношением

$$V = \frac{i}{nF} \quad (7)$$

С учетом входящих в уравнения значений постоянных и найденных ранее коэффициентов массопереноса ванадия в шлаке получим для шлака 40 CaO, 40 SiO<sub>2</sub>, 20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при 1823 К

$$v = 1,382 \cdot 10^{-5} C_V^0 \left[ 1 - \left( \frac{\Pi}{K} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (8)$$

Учет энергии активации диффузии трехвалентного ванадия в шлаке (145 кДж/моль) и связи скорости восстановления ванадия с вязкостью шлака (рис. 2), дает возможность представить уравнение (8) в виде

$$V = 1,382 \cdot 10^{-5} \exp \left[ 9,572 \left( 1 - \frac{1823}{T} \right) \right] C_V^0 \left( \frac{\mu_0}{\mu} \right)^{1/2} \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{3/2} \right], \quad (9)$$

где  $\mu_0$  – вязкость шлака (мас.%) 40 CaO, 40 SiO<sub>2</sub> 20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при заданной температуре;  
 $\mu$  – вязкость заданного шлака при этой температуре.

Скорости, рассчитанные по уравнению (9), в пределах ошибки опыта с учетом неточности в оценке вязкостей исследованных шлаков хорошо совпали с опытными скоростями восстановления ванадия (рис. 3). Это служит косвенным подтверждением электрохимического характера и диффузионного режима восстановления трехвалентного ванадия из шлаков углеродом железоуглеродистого расплава (чугуна или стали). Следует отметить, что данные результаты получены на воздухе. В условиях доменной плавки ванадий, преимущественно, должен находиться в двухвалентном состоянии. Для ионов V<sup>2+</sup> коэффициенты массопереноса в 5–7 раз меньше, чем для V<sup>3+</sup>, а энергия активации составляет порядка 170 кДж/моль. Кроме того, существенно отличается константа равновесия реакции восстановления. Поэтому уравнение (9) можно использовать только для трехвалентного ванадия.

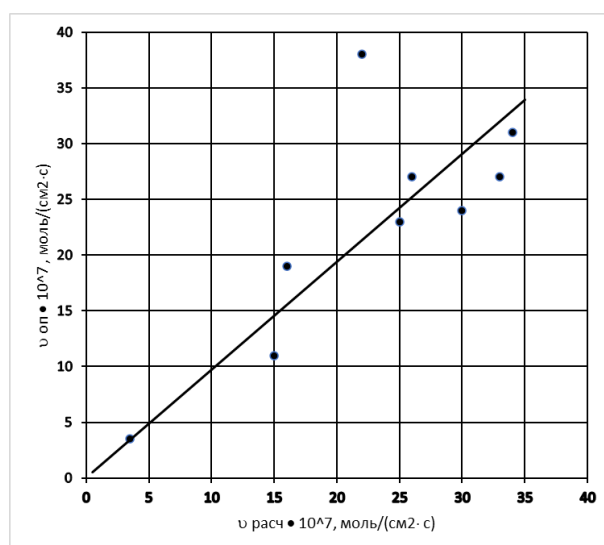


Рис. 3 Сопоставление рассчитанных по уравнению (9) и опытных скоростей восстановления ванадия насыщенным железоуглеродистым расплавом

#### Библиографический список

1. Металлургическая переработка ванадийсодержащих титаномагнетитов / Л. А. Смирнов, Ю. А. Дерябин, С. В. Шаврин. – Челябинск : Metallurgy, Челябинское отделение, 1990. – 256 с.
2. Резниченко В. А. Титаномагнетиты. Месторождения, металлургия, химическая технология / В. А. Резниченко, Л. И. Шабалин. – Москва : Наука, 1986. – 294 с.
3. Филиппенков А. А. Эффективные технологии легирования стали ванадием / А. А. Филиппенков, Ю. А. Дерябин, Л. А. Смирнов. – Екатеринбург : УрО РАН, 2001. – 210 с.
4. Смирнов Л. А. О восстановлении ванадиевого шлака углеродом жидкого полупродукта / Л. А. Смирнов, Б. И. Топычканов, В. Д. Шантарин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1969. – № 12. – С. 42.
5. Смирнов Л. А. Исследование процессов восстановления конвертерных ванадиевых шлаков углеродом расплавов Fe-C<sub>нас</sub> / Л. А. Смирнов, В. Д. Шантарин, Ю. С. Щекалев // Изв. АН СССР. Металлы. – 1970. – № 3. – С. 42.

6. Шантарин В. Д. Кинетика восстановления окислов железа и ванадия из оксидных систем железоуглеродистыми расплавами / В. Д. Шантарин, Л. А. Смирнов // ЖФХ. – 1970(44). – № 2. – С. 344.
7. Востряков А. А. Кинетика восстановления ванадия из шлака углеродом, кремнием и алюминием, растворенными в жидком железе / А. А. Востряков, Б. М. Лепинских // Физическая химия металлургических расплавов : Тр. ИМЕТ УФАИ СССР. Вып. 20. – Свердловск, 1969. – С. 100–154.
8. Цикарев В. Г. Поведение ванадия в системе конвертерный шлак – углеродистый восстановитель при 1100–1500 °С / В. Г. Цикарев, А. И. Пастухов, С. И. Попель // Производство стали : Труды Уральск. НИИ черн. метал. Т. 16. – Свердловск, 1972. – С. 18–23.
9. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – Москва : Физматгиз, 1959.
10. Климов А. В. Катодное восстановление ванадия из алюмосиликатных расплавов / А. В. Климов // Физико-химические исследования металлургических процессов. Межвузовский сборник. Вып. 11. – Свердловск : Изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1983. – С. 112–116.
11. Топорищев Г. А. Катодное осаждение трехвалентного ванадия из оксидного расплава на жидкий чугун / Г. А. Топорищев, А. В. Климов, А. И. Поляков // Электродные процессы в галогенидных и оксидных электролитах. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1981. – С. 43–45.

## **КИНЕТИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАНАДИЯ ИЗ ШЛАКОВ ТВЕРДЫМ УГЛЕРОДОМ**

**Климов Александр Владимирович,**  
E-Mail: [a.v.klimov@urfu.ru](mailto:a.v.klimov@urfu.ru),  
Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Представлены результаты исследований кинетики восстановления ванадия твердым углеродом из шлаков системы CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO различного состава. Показано, что восстановление идет до карбида VC. Скорость процесса практически не зависит от содержания оксидов ванадия в шлаке, но обратно пропорциональна вязкости последнего. Образование карбидной пленки на поверхности углерода приводит к резкому, на порядок величины, снижению скорости восстановления. Процесс восстановления ванадия из оксидных расплавов твердым углеродом носит электрохимический характер и лимитируется стадией анодного горения углерода. При этом влияние вязкости шлака на кинетику процесса объясняется тем, что он контролируется скоростью роста и удаления газовых пузырей. Появление карбидной пленки, по-видимому, переводит процесс восстановления во внутридиффузионный режим, когда лимитирующим является перенос углерода и ванадия через карбидную пленку.

**Ключевые слова.** Ванадий, шлаки, твердый углерод, восстановление, скорость, вязкость шлаков.

В целях прогнозирования хода технологических процессов восстановления ванадия и автоматизированного управления ими в металлургических агрегатах необходимо иметь физико-химическую модель процесса. С физико-химической точки зрения важный в практическом отношении вопрос о кинетике восстановления ванадия из жидких шлаков твердыми углеродсодержащими материалами изучен недостаточно.

Уже достаточно давно восстановление  $V_2O_5$  и  $V_2O_3$  из жидких шлаков твердым углеродом исследовалось гравиметрическим методом [1, 2]. Опыты проводились на шлаке состава (мас. %) 35CaO, 30SiO<sub>2</sub>, 10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10MgO, 15CaF<sub>2</sub>. Через 15–20 мин после начала опыта процесс сильно замедлялся. Изменение содержания  $V_2O_3$  в шлаке влияло на скорость значительно сильнее, чем изменение содержания  $V_2O_5$ . Для  $V_2O_5$  был найден 1-й порядок реакции по ванадию шлака, который подтвержден в работе [3]. Хотя сами же авторы [1, 2] высказали мнение, что процесс восстановления лимитируется стадией анодного горения углерода, и поэтому концентрация ванадия в кинетическое уравнение не входит. В целом процесс восстановления ванадия из шлака твердым углеродом остается недостаточно изученным, в частности, не выявлено влияние состава шлака на скорость восстановления.

Проведенные нами исследования выявили ряд закономерностей, позволяющих судить о механизме процесса углетермического восстановления ванадия, и описать скорость процесса в зависимости от свойств оксидного расплава.

Исходные составы исследованных шлаков представлены в табл. 1. В них добавляли определенное количество  $V_2O_3$  (шлаки 1–4) или  $V_2O_5$  (шлаки 5–8). Опыты проводили в графитовых тиглях. В тигель помещали тщательно перемешанную смесь оксидов (крупность менее 0,1 мм) заданного состава. Часть тигля изолировали от шлака вставленной трубкой из корунда, что обеспечивало постоянство рабочей поверхности при вспенивании шлака. Печь разогревали примерно на 100° выше заданной для опыта температуры. Температуру контролировали термопарой ВР-5/20. Тигель со смесью прогревали в верхней части печи и опускали в рабочую зону. На расплавление шлака и установление необходимой температуры в этом случае требовалось две минуты. После этого начинали отбор проб намораживанием на вольфрамовый стержень. Закалку пробы проводили под водой.

Концентрация  $V_2O_3$  менялась со временем линейно (рис. 1). При этом на кривой выделяются два основных участка: в начальный период опыта наблюдается сильное снижение концентрации  $V_2O_3$  в шлаке, а затем процесс резко замедляется так, что на кривых (%  $V_2O_3$ ), т появляется излом. Такой характер зависимости возможен в том случае, если поверхность восстановителя блокируется продуктами реакции. Действительно, на границе раздела шлак – тигель образовывалась пленка карбидов ванадия, в основном состоящая, как показали рентгеноструктурные исследования, из карбида VC. Появление пленки карбидов заметно снижает скорость восстановления ванадия твердым углеродом (табл. 2). Наличие для шлака 8 одного линейного участка объясняется низкой скоростью восстановления. Количество ванадия, восстановившегося за время опыта до карбида, было недостаточным, чтобы полностью закрыть реакционную поверхность тигля.

Таблица 1  
Исходные составы исследованных шлаков (масс. %) по синтезу

№ шлака	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	t, °C
1	45	35	20	–	1550
2	50	30	20	–	1550
3	55	25	20	–	1550
4	35	45	20	–	1550
5	41	23	28	8	1500
6	44	24	24	8	1550
7	32,5	18	43,5	6	1600
8	43	–	51	6	1530

Сравнение скоростей процесса в опытах 1–4 со скоростями в опытах 5–8 показывает, что они практически независят от формы добавляемого ванадия и исходной концентрации ванадия в шлаке. Видимо, в условиях опыта при высоких температурах успева­ет происходить переход ванадия в низшие валентные состояния. Другой причиной отмеченного факта может быть та, что лимитирующая стадия процесса не связана с разрядом ионов ванадия.

Таблица 2

Скорости восстановления ванадия углеродом тигля, моль/(см<sup>2</sup>·с)

№ шлака	$v \cdot 10^8$ для 1-го участка	$v \cdot 10^8$ для 2-го участка
1	37,3	1,38
2	14,7	7,45
3	87,2	0
4	58,5	6,94
5	82,2	7,79
6	57,0	8,65
7	56,5	5,92
8	1,14	–

Чтобы выявить зависимость скорости от состава шлака, по справочным данным [4, 5] оценили вязкость шлаков, использованных в опытах. Влиянием добавок V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> на вязкость шлаков пренебрегли. На рис. 2 представлена зависимость скорости углетермического восстановления ванадия на обоих участках от вязкости в координатах  $v_v, \mu$  и  $v_v, 1/\mu$ . Оказалось, что скорость восстановления на первом линейном участке обратно пропорциональна вязкости, а на втором линейном участке после излома не зависит от вязкости и практически постоянна. Отсутствие связи скорости восстановления с динамическими характеристиками шлака свидетельствует о том, что в последнем случае процесс лимитируется причинами, не связанными со шлаком, в частности, вероятно, с диффузией углерода и ванадия через карбидную фазу.

Зависимость скоростей восстановления от вязкости шлака на начальных участках связано нами с анодным окислением углерода в качестве лимитирующей стадии. Как было показано нами в работе [6], скорость анодного окисления твердого углерода в вязких шлаках может определяться скоростью роста и удаления газовых пузырей, которая обратно пропорциональна вязкости расплава.

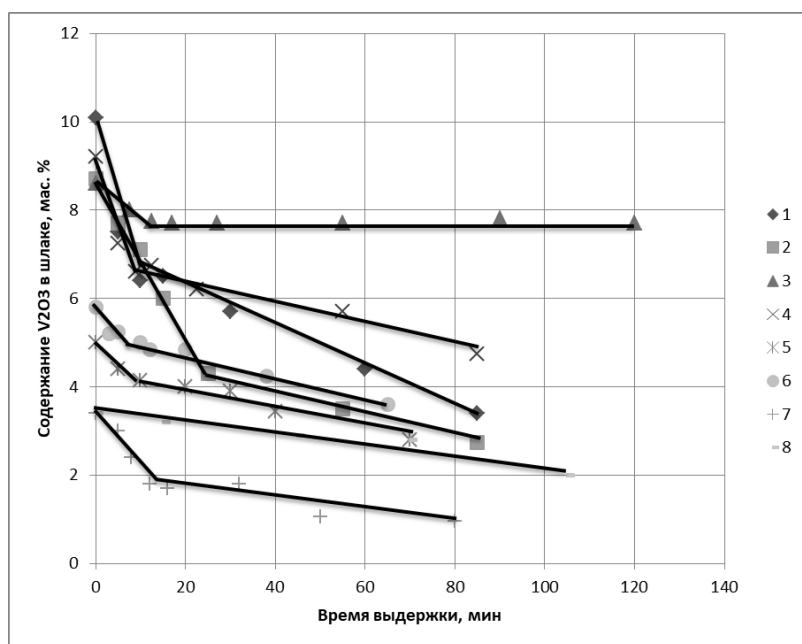


Рис. 1 Изменение концентрации V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> со временем при восстановлении углеродом тигля

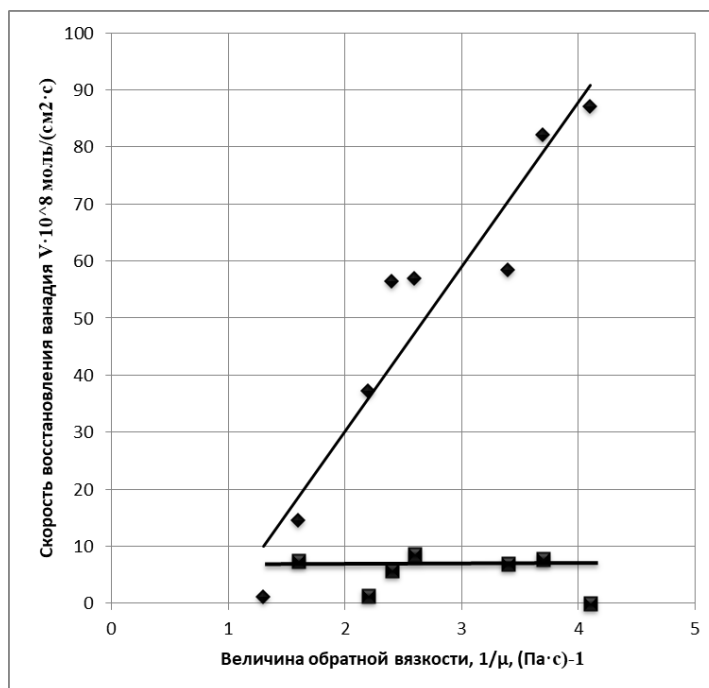


Рис. 2 Связь скоростей восстановления ванадия с обратной вязкостью шлаков для разных участков концентрационных кривых

При совместном восстановлении ванадия насыщенным железом углеродистым расплавом и углеродом тигля количество ванадия, восстановленное металлом, определяли по анализу металла, а количество ванадия, восстановленное углеродом стенок тигля, определяли по разности между ним и общим количеством восстановленного ванадия. В этом случае излома, связанного с карбидообразованием, не наблюдалось вплоть до глубокого (90–95 %) извлечения ванадия. Концентрационные кривые (см. рис. 3, кривые 3, 4) плавно выходят на равновесие.

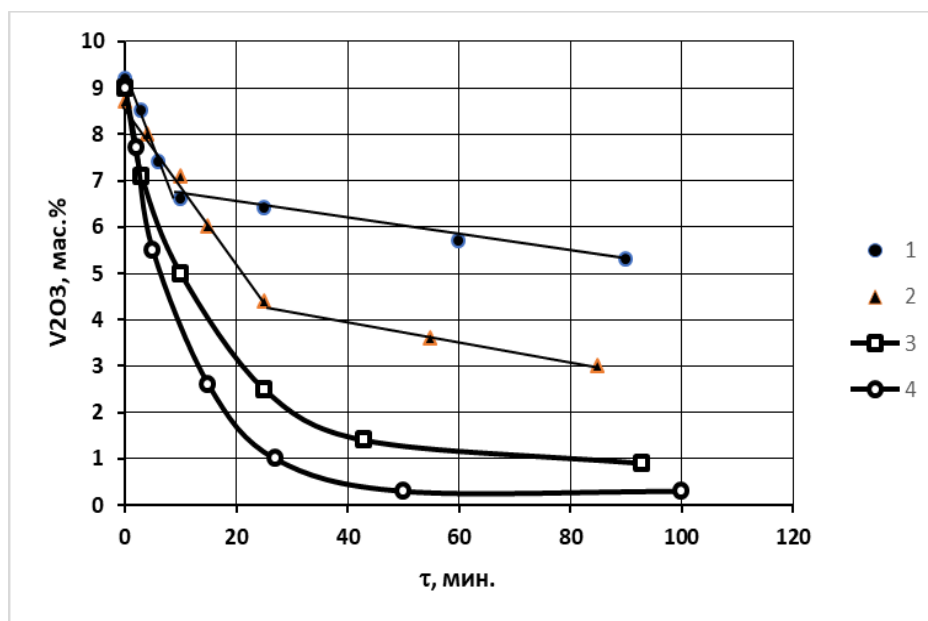


Рис. 3 Изменение концентрации  $V_2O_5$  со временем в шлаках (мас. %): 35 CaO, 45  $SiO_2$ , 20  $Al_2O_3$  (1, 3) и 50 CaO, 30  $SiO_2$ , 20  $Al_2O_3$  (2, 4) с добавкой  $V_2O_5$  при выдержке в графитовых тиглях без (1, 2) и в присутствии (3, 4) металла



Указанные факты можно объяснить, если предположить, что процесс восстановления ванадия из шлака твердым углеродом лимитируется анодной полуреакцией



При наличии в системе металлического расплава эта реакция может протекать на границе раздела металл – шлак, либо окисление углерода происходит на границе раздела металл – графит, поэтому блокировка стенок тигля карбидами не отражается на скорости процесса. Начальная скорость восстановления ванадия насыщенным железоуглеродистым расплавом в пересчете на моль ванадия примерно вдвое выше, чем твердым углеродом.

Таким образом, представленные результаты позволяют более детально судить о механизме восстановления ванадия из жидких шлаков твердым углеродом, а также указывают на решающую роль вязкости шлака в кинетике процесса. При выражении вязкости  $\mu$  в Па·с уравнение скорости, выраженной в моль/(см<sup>2</sup>·с), имеет вид

$$v = \left( \frac{28,879}{\mu} - 27,572 \right) \times 10^{-8} \quad (2)$$

#### Библиографический список

1. Лямкин С. А. Кинетика совместного восстановления металлов из шлаков твердым углеродом: дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Лямкин Сергей Анатольевич ; науч. рук. В. Н. Бороненков. – Екатеринбург : УПИ, 1973.
2. Бороненков В. Н. Кинетика восстановления металлов из оксидных расплавов: дис. ... докт. техн. наук : 05.16.02 / Бороненков Владислав Николаевич. – Екатеринбург : УПИ, 1974.
3. Востряков А. А. Изучение кинетики восстановления ванадия из оксидных расплавов методом электродвижущих сил / А. А. Востряков, Б. М. Лепинских, А. Д. Неуймин // Труды ИМЕТ УФАН СССР, вып. 25. – Екатеринбург, 1971. – С. 134–137.
4. Воскобойников В. Г. Свойства жидких доменных шлаков / В. Г. Воскобойников, Н. Е. Дунаев [и др.]. – Москва : Металлургия, 1975. – 184 с.
5. Мазурин О. В. Свойства стекол и стеклообразующих расплавов : справочник. Т. 3. Ч. 1 / О. В. Мазурин, М. В. Стрельцина, Т. П. Швайко-Швайковская. – Ленинград : Наука, 1977.
6. Климов А. В. Влияние вязкости на кинетику анодного окисления твердого углерода в силикатных расплавах / А. В. Климов // Труды XIII Российской конференции «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов. Т. 3. Экспериментальное изучение шлаковых расплавов, взаимодействие металл-шлак». – Екатеринбург : УрО РАН, 2011. – С. 44–47.

# ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ СВАРНОГО ШВА НА ХАРАКТЕР РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ ВЕРОЯТНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ГОРЯЧИХ ТРЕЩИН

Королев Сергей Анатольевич,

E-Mail: korolevsa@bmstu.ru,

Зимаков Артем Евгеньевич,

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

Национальный исследовательский университет,  
г. Москва

**Аннотация.** В статье приводятся результаты численного моделирования деформации области сварного шва, находящейся в температурном интервале возможного образования горячих трещин. Рассмотрены разные схемы кристаллизации и типы кристаллического строения сварного шва.

**Ключевые слова.** Горячие трещины, схема кристаллизации, кристаллическое строение, высокотемпературные деформации.

## Введение

Горячие трещины (ГТ) в шве являются одной из проблем свариваемости современных конструкционных материалов [1]. Трещины любой природы в сварной конструкции – недопустимый дефект. Практика показывает, что предотвращение образования дефекта в сварном соединении всегда более выгодно, чем его исправление. Оптимальный способ предотвращения образования ГТ – расчетная оценка вероятности их образования на этапе принятия конструкторско-технологических решений.

Существующие методики такой расчетной оценки [2, 3] опираются на физическую модель образования ГТ, предложенную профессором МГТУ им. Н. Э. Баумана Прохоровым Н. Н., являющимся основоположником теории технологической прочности металлов в процессе сварки.

Согласно этой модели, факторами, определяющими образование ГТ, являются:

- температурный интервал хрупкости (ТИХ), °С;
- минимальная пластичность в ТИХ, %;
- действующий темп высокотемпературных деформаций ( $\alpha_d$ ), %/°С.

Величина ТИХ зависит от системы легирования, содержания основных легирующих элементов и вредных примесей. В настоящее время существуют методики ее расчетного определения [2, 3].

Действующий темп деформации зависит от особенностей геометрии свариваемой конструкции, места расположения сварного шва, условий закрепления, режима сварки и т. д. Количественно действующий темп деформации может быть определен только численными методами, например, методом конечных элементов (МКЭ) [2, 3].

Наиболее сложной задачей остается моделирование деформации зоны сварного шва, находящейся в температурном интервале возможного образования ГТ. Это связано с тем, что указанная зона находится в неоднородном двухфазном состоянии. Решение данной задачи оказалось возможным с использованием современных численных методов [4].

В данной работе представлены результаты исследований деформации указанной зоны сварного шва в зависимости от схемы кристаллизации и кристаллического строения.

В качестве параметра, характеризующего схему кристаллизации сварного шва, была выбрана величина, определяемая отношением длины хвостовой части сварочной ванны к ее ширине –  $L/V$  (рис. 1). Этим параметром можно управлять посредством варьирования режима сварки.

Для анализа влияния кристаллического строения рассматривались модели сварных швов с полностью столбчатыми кристаллитами (рис. 1), а также с равноосными кристаллитами на оси шва (рис. 2).

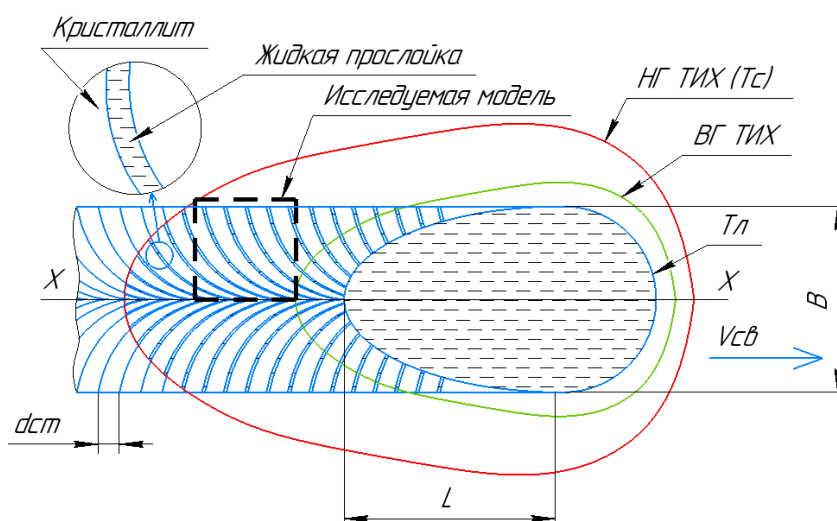


Рис. 1. Зона образования ГТ в модели с полностью столбчатыми кристаллитами (ТИХ, °С – температурный интервал хрупкости;  $T_l$  и  $T_c$ , °С – ликвидус и солидус;  $V_{ГТИХ}$  и  $H_{ГТИХ}$ , °С – верхняя и нижняя границы ТИХ,  $d_{cm}$ , мм – диаметр столбчатого кристаллита)

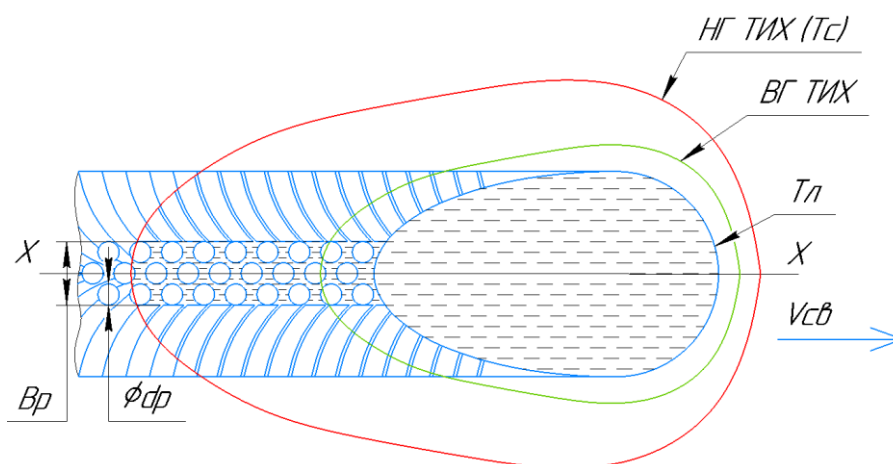


Рис. 2. Зона образования ГТ в модели с наличием зоны с равноосными кристаллитами на оси шва (ТИХ, °С – температурный интервал хрупкости;  $T_l$  и  $T_c$ , °С – ликвидус и солидус;  $V_{ГТИХ}$  и  $H_{ГТИХ}$ , °С – верхняя и нижняя границы ТИХ,  $d_p$ , мм – диаметр равноосного кристаллита,  $B_p$ , мм – ширина зоны с равноосными кристаллитами)

Для сварных швов с полностью столбчатыми кристаллитами также рассматривалось влияние их начального диаметра ( $d_{cm}$ ). Этот диаметр обычно равен диаметру зерен основного металла.

Для сварных швов с равноосными кристаллитами на оси шва рассматривалось влияние как их диаметра ( $d_p$ ), так и ширины зоны с данной структурой ( $B_p$ ). Эти характеристики сварного шва также поддаются управлению за счет варьирования режима сварки и модифицирования.

#### Методика проведения исследований

Моделирование выполнялось методом конечных элементов при помощи программы ANSYS. Воспроизводимые внешние нагрузки соответствовали условиям стандартных машинных испытаний на сопротивляемость образованию ГТ и сварке технологических проб переменной жесткости.

### Результаты и их обсуждение

Моделирование показало, что для указанных условий распределение деформаций в поперечном сечении всех исследуемых сварных швов с разными схемами кристаллизации и кристаллическим строением не является гладким, а дискретно реализовывалось только по жидким прослойкам между кристаллитами. Деформирования кристаллитов не наблюдалось.

Для сварных швов с полностью столбчатыми кристаллитами основная часть деформации всегда сосредотачивалась на оси шва (рис. 3, рис. 4), а для сварных швов с равноосными кристаллитами в зоне с данной структурой (рис. 5).

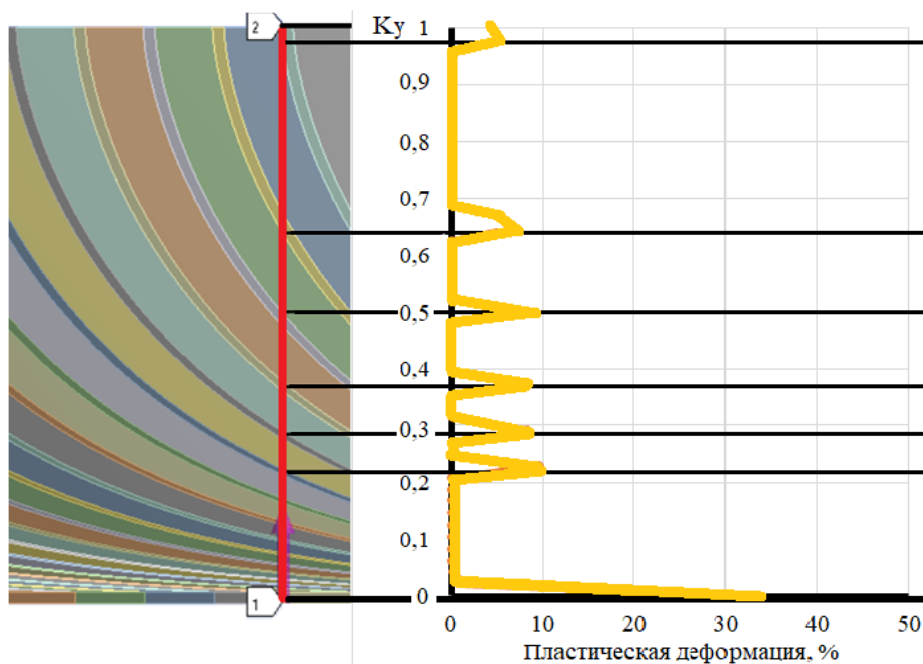


Рис. 3. Распределение деформаций в сварном шве с полностью столбчатым кристаллическим строением для схемы кристаллизации, характеризующейся соотношением  $L/B = 1$  ( $K_y$  – коэффициент, численно равный отношению расстояния от оси шва к половине ширины шва)

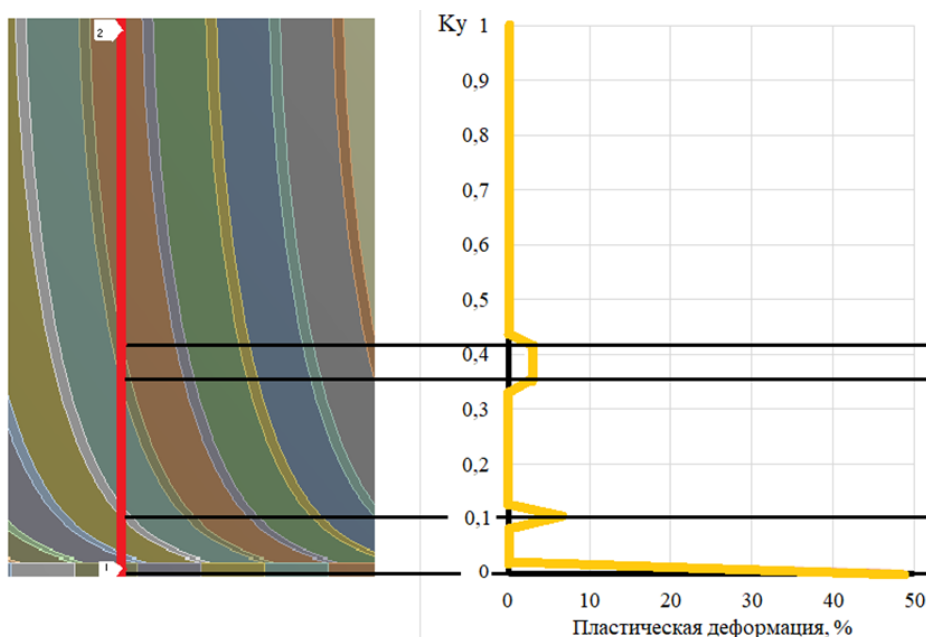


Рис. 4. Распределение деформаций в сварном шве с полностью столбчатым кристаллическим строением для схемы кристаллизации, характеризующейся соотношением  $L/B = 5$  ( $K_y$  – коэффициент, численно равный отношению расстояния от оси шва к половине ширины шва)

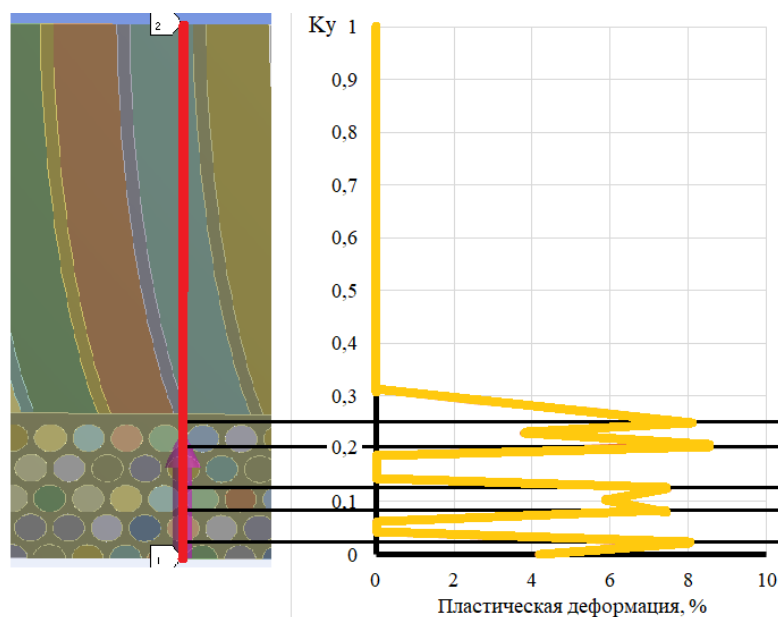


Рис. 5. Распределение деформаций в сварном шве с равносными кристаллитами на оси шва для схемы кристаллизации, характеризующейся соотношением  $L/B = 5$  ( $K_u$  – коэффициент, численно равный отношению расстояния от оси шва к половине ширины шва)

На рис. 3–5 приведено типовое распределение максимальных пластических деформаций по сечению шва. Данный характер распределения наблюдался для всех исследуемых в данной работе схем кристаллизации. Для удобства использования максимальные деформации приведены в зависимости от коэффициента  $K_u$  (отношение расстояния от оси шва к половине ширины шва).  $K_u$  равно 0 соответствует оси шва, а значение  $K_u$  равно 1 соответствует линии сплавления.

Также было установлено, что для сварных швов со столбчатыми кристаллитами с разной схемой кристаллизации, испытывающих одинаковое внешнее воздействие, имеет место разный уровень деформаций в центре шва. Более высокий уровень локальных деформаций наблюдается для сварных швов с более длинной хвостовой частью сварочной ванны. Также этот уровень увеличивается при увеличении начального диаметра столбчатых кристаллитов (рис. 6).

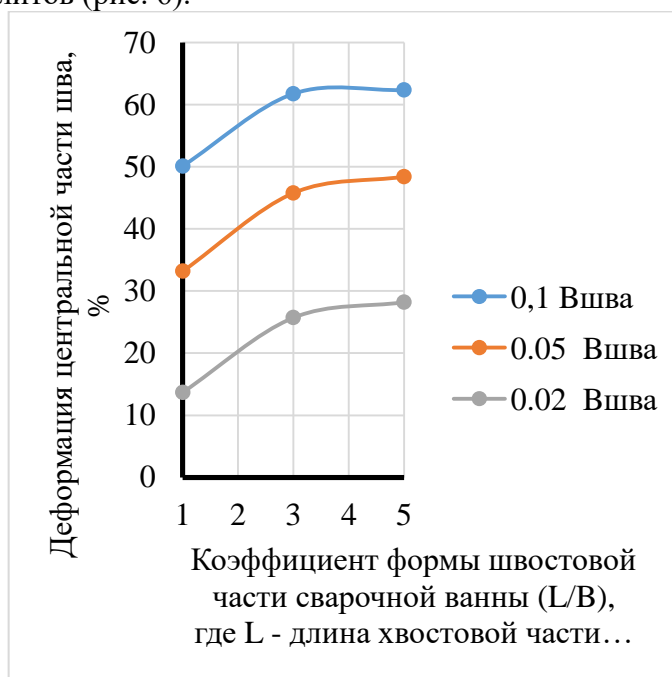


Рис. 6. Влияние схемы кристаллизации сварных швов с полностью столбчатым кристаллическим строением на деформацию центральной части сварного шва

Кроме того, установлено, что максимальный уровень локальных деформаций сварных швов с равноосными кристаллитами на оси шва значительно меньше по сравнению со швами со столбчатыми кристаллитами для аналогичных схем кристаллизации (рис. 3–5). Величина этого уровня снижается с уменьшением диаметров равноосных кристаллитов и увеличением ширины зоны с данной структурой (рис. 7).

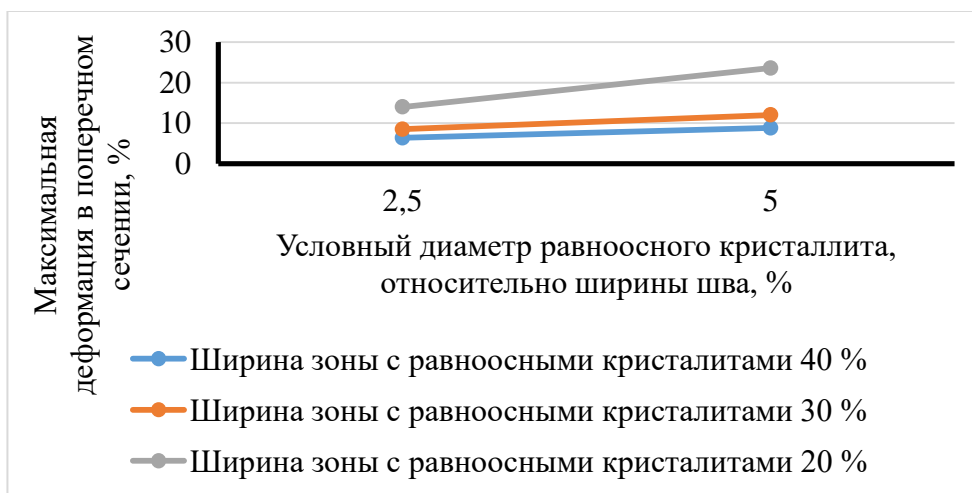


Рис. 7. Влияние диаметра равноосного кристаллита и ширины зоны с равноосной первичной структурой на деформацию центральной части сварного шва

### Выводы

Полученные закономерности согласуются с имеющимися практическими данными и могут быть использованы при подборе режимов сварки, а также при разработке сварочных материалов и других технологических способов, влияющих на схему кристаллизации и кристаллическое строение сварных швов, с целью управления сопротивляемостью образованию ГТ.

### Библиографический список

1. Теория свариваемости сталей и сплавов / Э. Л. Макаров, Б. Ф. Якушин; под ред. Э. Л. Макарова. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 549, [3] с.: ил.
2. Королев С. А. Оценка стойкости сварных швов конструкций из алюминиевых сплавов против образования горячих трещин / С. А. Королев // Известия вузов. Машиностроение. – 2007. – № 3. – С. 51–56.
3. Макаров Э. Л. Методика расчетной оценки стойкости сварных швов алюминиевых листовых конструкций против образования горячих трещин / Э. Л. Макаров, С. А. Королев // Сварка и диагностика. – 2009. – № 2. – С. 11–16.
4. Королев С. А. Математическое моделирование распределения высокотемпературных деформаций металла сварного шва, находящегося в твердожидком состоянии, в зависимости от схемы кристаллизации / С. А. Королев, А. Е. Зимаков // Сварка и Диагностика. 2020. – №1. – С. 30–33.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАРБОНИТРАЦИИ СТАЛИ 10

**Коротков Владимир Александрович,**

E-Mail: [vk@udgz.ru](mailto:vk@udgz.ru),

**Исаков Дмитрий Викторович,**

E-Mail: [d.v.isakov@urfu.ru](mailto:d.v.isakov@urfu.ru),

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

**Аннотация.** В работе исследовано влияние жидкостного азотирования (карбонитрации) на твердость, износостойкость и магнитные характеристики электротехнической стали марки 10, а также на электрическое контактное сопротивление. Установлено, что горячекатанная сталь 10 в результате отжига незначительно снижает твердость. Карбонитрация на поверхности образцов создает упрочненный слой с более высокой твердостью, высокой износостойкостью и повышенным электрическим сопротивлением. Контактное электрическое сопротивление карбонитрированных образцов выше по сравнению с сопротивлением горячекатаных образцов, очищенных от окалины. Магнитная проницаемость стали марки 10 в результате отжига и карбонитрации практически не изменяется, при этом зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля имеют типичный для углеродистых сталей вид и значения. Традиционные методы обработки электротехнических сталей, проводимые с целью достижения подобного комплексного эффекта, комбинируют разнородные процессы, такие как гальванические, вакуумные, плазменные, высокотемпературный отжиг, нанесение лаковых покрытий, являются весьма дорогостоящими и трудно реализуемыми. Карбонитрация более доступна для практического применения и имеет существенно меньшую стоимость. Полученные результаты могут использоваться при проектировании магнитопроводов для различных электротехнических устройств.

**Ключевые слова.** Карбонитрация, твердость, износостойкость, поверхностный слой, магнитная проницаемость, контактное сопротивление.

### 1. Введение

Электротехнические стали (ЭТС) используются для изготовления магнитопроводов электрических машин и приборов. Значительная их часть представляет собой технически чистое железо с невысокой твердостью ~HV130 (HV130). В результате его механической обработки, сопровождающейся наклепом, происходит измельчение зерна, наведение остаточных напряжений, и как следствие понижение магнитной проницаемости, увеличение коэрцитивной силы. Для улучшения (восстановления) электромагнитных свойств ЭТС практикуется проведение отжига [1]. Другой особенностью использования ЭТС является нанесение на ее поверхность диэлектрических покрытий, с целью уменьшения токов Фуко и электромагнитных потерь при работе [2, 3]. Кроме того, некоторые детали из ЭТС нуждаются в защите рабочих поверхностей от износа в результате трения, например, электромагнитные муфты. С этой целью на их поверхность (в ваннах, содержащих тиофосфат натрия) осаждают слой химникаля 3...5 мкм, а затем напыляют порошок карбида бора. При последующем вакуумном отжиге формируется твердый слой ~HV2015 боридов и никельборидов высокой износостойки [4]. Несомненно, это эффективное упрочнение, ибо рост твердости составляет более 15 раз (HV2015/HV130), но оно достигается сложным комбинированием разнородных процессов (гальванического, плазменного, вакуумного), что делает его не только дорогостоящим, но еще и трудно осуществимым.

Перспективной обработкой, улучшающей механические и электромагнитные свойства ЭТС, может рассматриваться жидкостное азотирование или карбонитрация. Она проводится при достаточно высокой температуре ~570 °С, чтобы вызвать устранение наклепа, остаточных напряжений и, как следствие, – улучшение электромагнитных свойств. Кроме того, в результате ее проведения на поверхности формируется твердое покрытие, увеличивающее и сопротивление изнашиванию, повышающее долговечность деталей [5].

Целью настоящей работы является исследование влияния жидкостного азотирования (карбонитрации) на электромагнитные и дюротметрические характеристики нелегированной электротехнической стали марки 10.

## 2. Материал, обработка и подготовка образцов

Образцы для исследований изготавливались механической обработкой (вырубкой) из листового горячекатаного проката, толщиной 5 мм. Химический состав, мас. %: С – 0,08, Si – 0,17, Mn – 0,17, Cr – 0,04, Ni – 0,02, Cu – 0,05, S – 0,006, P – 0,012. Механические свойства по сертификату: предел прочности – 405 МПа, предел текучести – 290 МПа, относительное удлинение – 39,5 %. Электромагнитные и механические свойства определялись на образцах в состоянии поставки, а также после отжига при 800 и 950 °С. Условия проведения и значения твердости образцов до и после отжига приведены в табл. 1. Затем и те, и другие образцы подвергались карбонитрации, после чего исследования повторялись. Карбонитрация (жидкостное азотирование) выполнялось в промышленной ванне размерами: d 450 мм, h 900 мм с расплавом циановокислого калия Ч (KNCО) при температуре 575 °С.

Таблица 1  
Условия проведения отжига из стали 10 образцов и их твердость

Защитная среда при отжиге	Температурный цикл отжига	Твердость, HRB Прибор TP-5006	
		До отжига	После отжига
Вакуум: остаточное давление (4-8)10 <sup>-4</sup> Па	1 ч – нагрев от 400 до 800 °С 4 ч – выдержка при 800 °С 4 ч – остывание с печью от 800 до 400 °С, далее на воздухе	90	78
Продувка аргоном печного пространства, 20 л/мин	2 ч – нагрев от 400 до 950 °С 3 ч – выдержка при 950 °С 15 ч – остывание с печью от 950 до 400 °С, далее на воздухе		62

## 3. Исследование механических свойств

Образцы размером 10×10×5 мм. Измеряли твердость образцов до и после отжига прибором TP-5006 по шкале HRB. Установлено (таб. 1), что исходная твердость HRB 90 уменьшилась до HRB 78 – при температуре отжига 800 °С, и более значительно, до HRB 62 – при температуре отжига 950 °С. При различной нагрузке на индентор выполнялись измерения твердости прибором ПМТ-3М поверхностей образцов после кратковременной карбонитрации в течение 10 мин. По графикам на рис. 1 видно следующее: при малой нагрузке на индентор (10 г) твердость стали, карбонитрированной в состоянии поставки, составила HV102, что несколько выше значений HV77...89, полученных при нагрузках ≥ 20 г. Это различие объясняется тем, что толщина слоя карбонитрации соизмерима с глубиной проникновения индетора [4, 5]. Поэтому измеренные значения представляют собой интегральную твердость карбонитрированного слоя и лежащего под ним менее твердого основного металла.



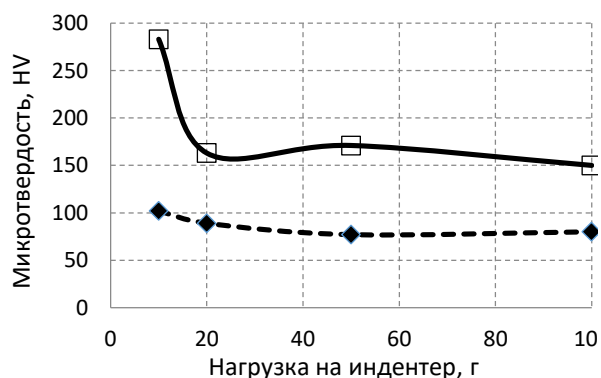


Рис. 1 Микротвердость поверхности образцов  
 - -●- - карбонитрированных в состоянии поставки (без отжига)  
 —□— карбонитрированных в состоянии после отжига при 800 °C

Очевидно, что при малой нагрузке на индентор глубина его проникновения меньше, чем при большой нагрузке, и влияние твердого карбонитрированного слоя на результирующую твердость значительнее. Отсюда значение твердости при малой нагрузке на индентор выше, чем при более высоких нагрузках. Предварительный отжиг при 800 °C вызвал увеличение твердости карбонитрированной поверхности (рис. 1). Логично допустить, что им облегчилось протекание диффузионных процессов при карбонитрации, что сопровождалось увеличением толщины упрочненного слоя. На это также указывает значительное увеличение твердости от HV102 до HV283 при малой нагрузке 10 г на индентор.



Рис. 2 Г-образные образцы для исследования твердости и магнитной проницаемости

Г-образные образцы.

Магнитная проницаемость стали 10 исследовалась с использованием магнитопровода составленного из Г-образных образцов, показанных на рис. 2.

Перед карбонитрацией в течение 3-х ч, часть образцов проходила отжиг (950 °C) и часть образцов карбонитрировалась в состоянии поставки. Затем от концов Г-образных образцов, специально предназначенных для этого, отрезались темплеты, на которых в поперечном сечении приготавливались шлифы для исследования твердости. Результаты измерений приведены на рис. 3.

На рис. 3 видно, что твердость в поперечном срезе вблизи поверхности составляет ~HV 360. Это значение близкое значению, полученному при измерении твердости на поверхности образца, карбонитрированного после отжига (рис. 1). На удалении от поверхности твердость Г-образных образцов снижается, но на образце без отжига она несколько выше твердости образцов, прошедших отжиг до карбонитрации. Вероятно, это объясняется более высокой твердостью основного металла, на котором располагается тонкий карбонитрированный слой (табл. 1).

С конца 90-х гг. прошлого столетия в промышленности получили распространение приборы ультразвукового измерения твердости, типа УЗИТ-3. Ими твердость определяется по резонансной частоте магнитострикционного стержня с алмазной пирамидкой, внедряемой в измеряемую поверхность. При этом усилие внедрения в приборе задано небольшим так, что глубина отпечатка составляет ~12 мкм [6]. Преимущество приборов такого типа перед стационарными твердомерами состоит в том, что с их помощью твердость можно измерять прямо в производственном процессе непосредственно на изготавливаемых деталях, охватывая контролем до 100 % выпускаемой продукции. В связи с этим проведены измерения твердости стали 10 после карбонитрации прибором УЗИТ-3. Было установлено после 3-х часовой карбонитрации, на отожженных образцах при 950 °C, твердость составляет HRC60, что в переводе на шкалу Виккерса

равняется HV~800, и HRC56 (HV~700) – на образцах в состоянии поставки. Эти значения превышают значения твердости, полученные микротвердомером, и приведенные на рис. 3, а значит, нуждаются в объяснении.

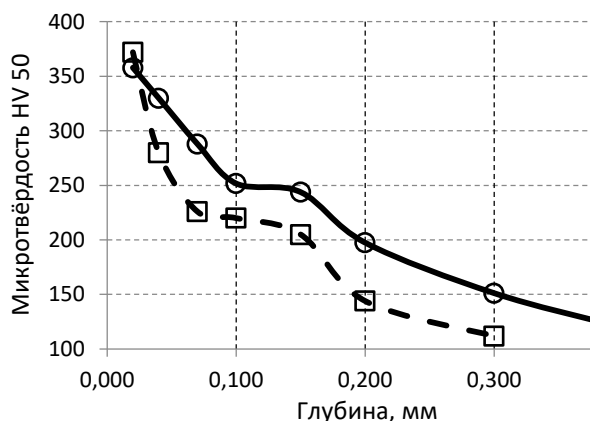


Рис. 3 Распределение твердости от поверхности после 3-х часовой карбонитрации  
 —○— состояние поставки  
 - -□- - отжиг 950°C

С целью уточнения значений твердости карбонитрированного слоя приняли меры по увеличению его площади доступной измерению. Для этого поверхность образца шлифовали под углом около 8 градусов. В результате, видимый участок упрочненного слоя на срезе (рис. 4) увеличился в ~8 раз, и попадание в него индентором происходило без затруднения.

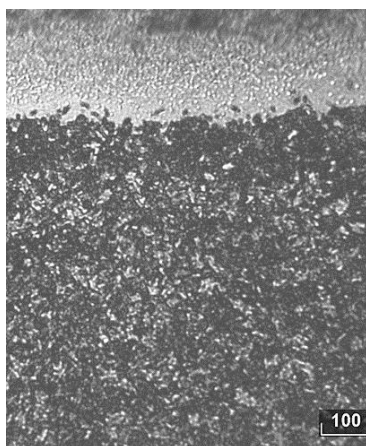


Рис. 4 Слой карбонитрации на шлифе, сделанном под углом 8° к поверхности

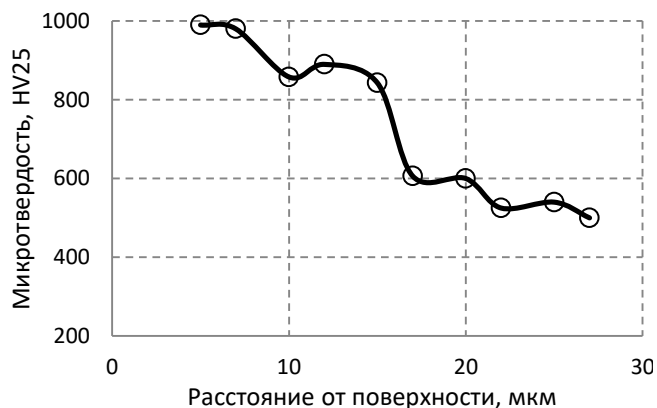


Рис. 5 Распределение твердости по глубине образца, карбонитрированного в течение 3 ч после отжига 950 °C

Кроме того, была вдвое уменьшена нагрузка (25 г) на индентор, что снижало вероятность проникновения индентора из твердого, но тонкого слоя карбонитрида, на более мягкий основной металл. Измерения были выполнены на микротвердомере *FUTURE TECH FM-300*, Япония, под управлением программного комплекса «*Thixomet*». Распределение твердости по глубине карбонитрированного слоя представлено на рис. 5. При этом расстояния, измеренные на микрошлифе, умножались на 0,13. По графику можно отметить, что наибольшие значения твердости HV<sub>25</sub> 800...1000, имеют место на глубине до 15 мкм, и указывают на толщину слоя карбонитрида. Располагающаяся под ним зона диффузионного насыщения металла азотом на глубине 35 мкм стабилизируется по твердости на уровне ~HV<sub>25</sub> 530. Таким образом, установлено, что фактическая твердость тонкого слоя (15 мкм) твердого карбонитрида на поверхности стали 10 составляет HV<sub>25</sub> 800...1000, а более низкие его значения на рис. 3 объясняются проникновением индентора в располагающийся под ним, более мягкий основной металл.

Составить представление о влиянии карбонитрации на износостойкость стали 10 позволяют результаты, полученные в условиях сухого трения по схеме диск-колодка на машине трения МИ-1М. Установлено, что износ карбонитрированного диска из стали 10 по нормализованной колодке из стали 45 на первом этапе приработки в ~10 раза меньше, чем износ диска из нормализованной стали 45, а общий износ за 4-е этапа испытаний, каждый по 5 мин – меньше в ~20 раз.

#### 4. Исследование магнитных свойств

Приготавливались образцы (рис. 1) из стали марки 10 в четырех различных состояниях: 1) горячекатанное; 2) после отжига 950 °С (без карбонитрации); 3) после карбонитрации горячекатанных образцов; 4) после отжига 950 °С и карбонитрации.

Магнитные свойства стали до и после карбонитрации исследовались по методу амперметра и ваттметра [8]. Магнитопровод выполнен из двух Г-образных элементов, образующих при совмещении замкнутый контур. На магнитопроводе размещались две обмотки – генераторная (первичная) и измерительная (вторичная). Параметры обмоток и магнитопровода приведены в табл. 2. К генераторной обмотке подводилось синусоидальное напряжение частотой 50 Гц, и по результатам измерений тока первичной обмотки, напряжения вторичной обмотки и потребляемой активной мощности определялись напряженность магнитного поля, магнитная индукция и магнитная проницаемость. Измерения токов и напряжений выполнялись мультиметрами М320 и М890F; потребляемая активная мощность – ваттметром Д539. Величина питающего напряжения регулировалась ЛАТРОм.

Таблица 2  
Параметры обмоток и магнитопровода

Наименование параметра	Обозначение	Ед. изм.	Значение
<i>Магнитопровод</i>			
Длина магнитопровода средняя	$l_{cp}$	м	0,28
Толщина 1-го листа магнитопровода	$b$	м	0,004
Количество листов в пакете			2
Эффективная площадь сечения магнитопровода	$S_{мэ}$	м <sup>2</sup>	0,00016
Масса магнитопровода	$m$	кг	0,44
<i>Первичная обмотка</i>			
Число витков	$W_1$		2700
Сечение проводника	$q_{пр1}$	мм <sup>2</sup>	0,05
Активное сопротивление	$R_1$	Ом	127,2
<i>Вторичная (измерительная) обмотка</i>			
Число витков	$W_2$		4850
Сечение проводника	$q_{пр2}$	мм <sup>2</sup>	0,025
Активное сопротивление	$R_2$	Ом	367

Амплитудное значение магнитной индукции рассчитывалось по формуле из [9], при допущении синусоидальности магнитного потока:

$$B_m = \frac{\sqrt{2}E_2}{2\pi f S W_2}, \quad (1)$$

где  $E_2$  – действующее значение ЭДС, индуцируемой во вторичной обмотке,

$f$  – частота питающего напряжения,

$S$  – площадь сечения магнитопровода,

$W_2$  – число витков вторичной (измерительной) обмотки.

При замене реальных токов и напряжений эквивалентными синусоидальными (критерий эквивалентности – равенство среднеквадратичных значений), а также с учетом активных потерь в магнитопроводе и при условии приведения параметров катушек и магнитной цепи к первичной обмотке, расчетная формула амплитуды напряженности магнитного поля примет следующий вид:

$$H_m = \sqrt{2} \cdot \frac{W_1}{l_{cp}} \cdot \sqrt{I_1^2 - \left(\frac{P_{ст}}{E_2 W_1}\right)^2}, \quad (2)$$

где  $I_1$  – действующее значение тока в первичной (генераторной) обмотке,

$l_{cp}$  – средняя длина магнитопровода,

$W_1, W_2$  – числа витков обмоток,

$P_{ст} = P_1 - I_1^2 R_1$  – потери в магнитопроводе,

$P_1$  – потребляемая активная мощность,

$R_1$  – активное сопротивление первичной обмотки.

Относительная магнитная проницаемость ( $\mu$ ) определена как отношение амплитуды магнитной индукции к амплитуде напряженности магнитного поля и магнитной постоянной:  $\mu = B_m / (H_m \mu_0)$ .

Изложенная методика определения магнитных характеристик позволяет качественно оценить влияние термической обработки и карбонитрации на магнитные свойства сталей.

Измерение электрических характеристик выполнено по десяти точкам при токах в первичной обмотке от 0,05 А до 0,3 А, что соответствует амплитудам напряженности магнитного поля от 250 А/м до 2000 А/м. При проведении измерений первичная обмотка нагревалась и ее активное сопротивление изменялось в пределах от 127 Ом до 140 Ом.

Зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля получились типичными для углеродистых сталей (рис. 6, 7) [10, 11]. Характерный пик на диаграмме  $\mu(H)$  наблюдается в диапазоне напряженности магнитного поля от 300 до 400 А/м. Начиная с 1000 А/м и более происходит насыщение магнитопровода и создаются предельные величины магнитной индукции.

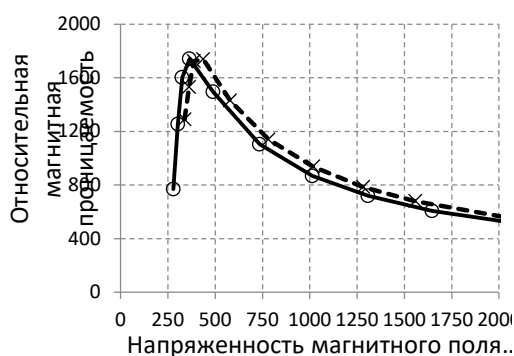


Рис. 6 Относительная магнитная проницаемость образцов безкарбонитрации  
—○— без отжига (исходное состояние)  
---x--- отжиг 950 °C

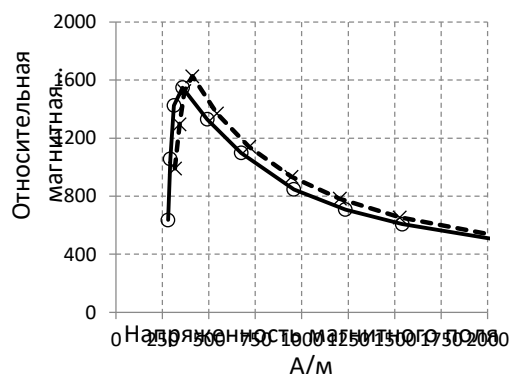


Рис. 7 Относительная магнитная проницаемость образцов после карбонитрации  
—○— карбонитрация без отжига  
---x--- карбонитрация после отжига 950 °C

По графикам можно видеть, что магнитные характеристики стали в исходном состоянии, в состоянии отжига при 950 °C и после карбонитрирования практически совпадают; незначительные отличия находятся в пределах погрешности измерений. Можно сделать вывод, что 4-х часовой отжиг 950 °C и карбонитрация при 575 °C практически не влияют на магнитные свойства горячекатаной стали 10.

## 5. Исследование контактного сопротивления

Образец (Г-образный, рис. 1) для измерения контактного сопротивления помещали между зачищенными до металлического блеска такими же Г-образными образцами (обложками) в горячекатаном состоянии (рис. 8). Электроды от измерительного прибора прижимали к обложкам с усилием 30 Н. Таким образом, в схеме измерения присутствовало четыре контактных (переходных) сопротивления: 2 – между электродом и обложкой и 2 – между обложкой и образцом. Измерения выполнялись миллиомметром SEW 6237 DLRO.

Проводились три серии опытов, в которых измеряемыми образцами служили: 1 – образец в горячекатанном состоянии, зачищенный до металлического блеска, 2 – горячекатанный образец со слоем имеющейся на нем окалины, 3 – карбонитрированный образец без поверхностной зачистки. Результаты представлены в табл. 3.

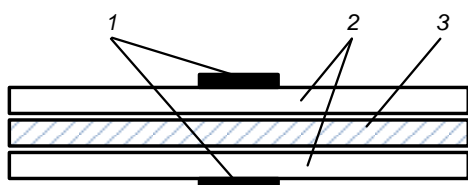


Рис. 8 Схема измерений  
1 – электроды, 2 – обложки,  
3 – исследуемый образец

Образцы	Контактное сопротивление, мОм
Горячекатанный образец, зачищенный до металлического блеска	18
Горячекатанный образец со слоем, имеющейся на нем окалины	1059
Карбонитрированный образец без поверхностной зачистки	65

Полученные результаты показывают следующее: наличие на образце окалины увеличивает его контактное сопротивление в 59 раз (1059/18), а наличие карбонитрированного слоя – в 3,6 раз (65/18). Высокое сопротивление горячекатаных образцов, объясняется плотной окисной пленкой (окалиной), сформированной нагревом в сочетании с высоким контактным давлением в ходе прокатки. Карбонитрированный слой, напротив, согласно известным представлениям [5, 6], имеет пористое строение, небольшую (5 мкм) толщину и обладает диэлектрическими свойствами химического карбонитрида.

#### Заключение

- Электротехническая горячекатаная сталь 10 в результате отжига снижает твердость от HRB 90 до HRB 62-78.
- Карбонитрация стали 10 в горячекатаном состоянии в течение 10 мин создает на поверхности упрочненный слой с твердостью 283 HV10. Карбонитрация в течение 3-х ч на отожженной стали создает упрочненный слой более высокой твердости, чем на стали в горячекатаном состоянии: HRC 60 и HRC 56, соответственно (прибор УЗИТ-3). Измерения с более глубоким проникновением индентора в поверхность (прибор ПМТ-3М), дают обратный результат (рис. 3), ибо влияние на него становится более значительным основного металла, который в результате отжига уменьшает твердость.
- Твердая карбонитрированная поверхность обеспечивает существенное (в 10–20 раз) снижение износа стали 10 в условиях сухого трения скольжения по нормализованной стали 45.
- Отжиг 950 °С и карбонитрация при 575 °С практически не влияют на магнитные свойства горячекатаной стали 10.
- Контактное электрическое сопротивление карбонитрированных образцов в 3,6 раза выше по сравнению с сопротивлением горячекатаных образцов, очищенных от окалины. При этом пористая структура карбонитрированной поверхности способна лучше удерживать лаковые диэлектрические покрытия.
- Полученные результаты могут использоваться при проектировании магнитопроводов для различных электротехнических устройств.

#### Библиографический список

1. Металловедение / Гуляев А. П., Гуляев А. А. – Москва : Альянс, 2011. – 644 с.
2. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин [и др.] ; под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., испр. и доп. – Москва : Высшая школа, 2005. – 767 с.

3. Способ получения электроизоляционного покрытия трансформаторных кремнийсодержащих сталей / Гусева С. В., Лыкасов А. А., Тепляков Ю. Н. Патент на изобретение RU 2600606 С1, 27.10.2016. Заявка № 2015115349/02 от 23.04.2015.
4. Патент на изобретение РФ 2181777. Способ изготовления и термической обработки деталей из магнитомягких сталей магнитных систем электрических реактивных двигателей малой тяги / Тарасов А. Н., Горбачев Ю. М., Мурашко В. М. Опубликовано: 27.04.2002. Бюл. № 12.
5. Прокошкин Д. А. Химико-термическая обработка металлов – карбонитрация / Д. А. Прокошкин. – Москва : Metallurg, Машиностроение, 1984. – 240 с.
6. Коротков В. А. Карбонитрация как средство снижения износа деталей металлургического оборудования / В. А. Коротков // Metallurg. – 2015. – № 12. – С. 63–68.
7. Руководство по эксплуатации ультразвукового измерителя твердости УЗИТ-3 РЭ 427113-002-20872624-00. – Екатеринбург, 2000.
8. Антонов В. Г. Средства измерений магнитных параметров материалов / В. Г. Антонов, Л. М. Петров, А. П. Щелкин. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
9. Теоретические основы электротехники: в 3 т. : учеб. для вузов. Т. 2. – 4-е изд. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – 576 с.: ил.
10. Казаджан Л. Б. Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов / Л. Б. Казаджан ; под. ред. В. Д. Дурнева. – Москва : ООО «Наука и технологии», 2000. – 224 с.
11. Герасимов В. Г. Электротехнический справочник : в 4 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / В. Г. Герасимов. – 9-е изд., испр. и доп. – Москва : Энергоиздат, 2007. – 440 с.

## **КАРБОСИЛАН-СИЛОКСАНОВЫЕ ДЕНДРИМЕРЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

**Леонтьев Лев Борисович,  
Шапкин Николай Павлович,  
Леонтьев Андрей Львович,  
E-Mail: leontyev.l.b@yandex.ru,  
Тутов Михаил Викторович,  
Шаршина Екатерина Андреевна,  
Дальневосточный федеральный университет,  
г. Владивосток**

**Аннотация.** Износостойкость трущихся поверхностей деталей трибоузлов машин, механизмов и оборудования является основным фактором, определяющим их долговечность и эксплуатационные издержки, а также необходимость ремонта. Решением проблемы повышения износостойкости и, соответственно, долговечности связано с применением различных методов упрочнения поверхностей трения и трибоактивных присадок в смазку.

Наиболее широкое применение нашли минералы слоистого строения: серпентиниты, вермикулит, слюды, глины, графит и т. д. и полимерные материалы. Их положительный эффект обусловлен способностью этих материалов образовывать на поверхностях трения тонкие пленки, обладающие высокими триботехническими свойствами. Однако природные триботехнические материалы имеют различный химический состав даже из одного месторождения, поэтому требуется большой объем работ по обеспечению необходимого состава, структуры и дисперсности частиц.

Карбосилан-силоксановые дендримеры можно получать с точно заданными молекулярной массой и размерами, что позволяет контролировать поверхностные свойства и морфологию получаемых материалов на их основе.

Триботехнические испытания покрытий, полученных при использовании карбосилан-силоксановых дендримеров, показали наиболее высокие триботехнические свойства в условиях трения при граничной смазке по сравнению с исходным или модифицированным вермикулитом. Применение гептила для формирования тонкопленочного покрытия обеспечивает лучшие триботехнические и эксплуатационные свойства по сравнению с бутилом благодаря более высокому содержанию углерода и меньшему – кремния.

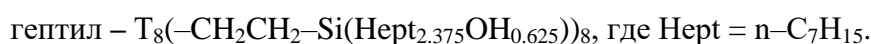
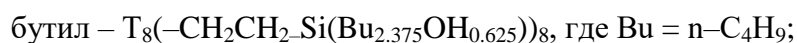
**Ключевые слова.** Карбосилан-силоксановые дендримеры, бутил, гептил, трение, износ, коэффициент трения

Износостойкость трущихся поверхностей деталей трибоузлов машин, механизмов и оборудования является основным фактором, определяющим их долговечность и эксплуатационные издержки, а также необходимость ремонта. Решением проблемы повышения износостойкости и, соответственно, долговечности связано с применением различных методов упрочнения поверхностей трения и трибоактивных присадок в смазку.

В настоящее время для модифицирования поверхностей трения применяется большое количество различных триботехнических материалов, которые способны формировать защитные металлокерамические пленки. Наиболее широкое применение нашли минералы слоистого строения: серпентиниты, вермикулит, слюды, глины, графит и т. д. и полимерные материалы. Их положительный эффект обусловлен способностью этих материалов образовывать на поверхностях трения тонкие пленки, обладающие высокими триботехническими свойствами. Однако природные триботехнические материалы имеют различный химический состав даже из одного месторождения, поэтому требуется большой объем работ по обеспечению необходимого состава, структуры и дисперсности частиц [1–3].

В этой связи большой практический интерес представляет задача разработки такого искусственного триботехнического материала, который обладал бы способностью создавать на поверхностях трения тонкопленочные покрытия с улучшенными трибологическими свойствами.

Карбосилан-силоксановые дендримеры относятся к новым органосилоксановым полимерам, имеющим дендримерную разветвленную структуру, содержащие в качестве ядра дендримера циклооктасилсесквиоксанный фрагмент, и имеющим концевые алкильные и гидроксильные группы, и могут найти промышленное применение для получения тонкопленочных покрытий с улучшенными трибологическими свойствами. Дендримеры имеют то преимущество, что их можно получать с точно заданными молекулярной массой и размерами, в то время как в случае обычных полимеров всегда имеется распределение по молекулярным массам и геометрии молекул. Это свойство дендримеров определяет их применение в качестве наноблоков для получения наногибридных полимерных материалов с заданным пространственным строением. Кроме того, имеющаяся возможность получения многофункциональных дендримеров с определенным количеством реакционноспособных (функциональных) концевых групп, что позволяет контролировать поверхностные свойства и морфологию получаемых материалов на их основе [4]. Карбосилан-силоксановые дендримеры 1-го поколения содержат во внешнем слое соответствующее количество алкильных заместителей (бутил-, гептил-) и гидроксильные группы, соединенные с концевыми атомами кремния дендримера, и описываются формулами:



Для сравнительных исследований были взяты следующие материалы: природный и модифицированный кислотой вермикулит (табл. 1) идендримеры: бутил (содержание углерода 60 %, кремния 20 %, остальное водород и кислород) и гептил (содержание углерода 68 %, кремния 14 %, остальное водород и кислород). Модифицированный вермикулит обеспечивает формирование весьма износостойкого тонкопленочного покрытия [1], поэтому он был взят для сравнительных испытаний.

Таблица 1  
Элементный состав исходного и модифицированного вермикулита

№	Триботехнический материал для формирования покрытия	Содержание элементов, %							
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	C	Следы
1	Исходный вермикулит	42,72	11,81	24,52	5,75	8,74	0,85	–	0,580
2	Вермикулит + HCl	89,63	5,18	1,06	1,01	0,34	0,17	–	0,017

Формирование покрытия выполняли за две технологические операции: модифицирование поверхности триботехническим материалом в течение 3 мин и собственно формирование в течение 1 ч. Модифицирование поверхностей трения осуществляли фрикционно-силовым методом, при этом триботехнический материал, состоящий из модифицирующего материала и моторного масла, предварительно наносится на упрочняемую поверхность и подается в зону трения каждые 15–20 с капельным методом, режим упрочнения приведен в табл. 2. В качестве индентора для упрочнения применяли ролик из стали 45 твердостью 56 HRC. Последующее формирование износостойкого металлокерамического покрытия осуществляется тем же индентором, смазку пары трения осуществляли моторным маслом капельным способом (5–6 капель в мин) без модификатора, режим формирования приведен в табл. 2.

Триботехнические испытания проводили на универсальной машине трения модели УМТВК по схеме «ролик – колодка» в условиях граничного трения при постоянной скорости скольжения 0,63 м/с [1]. В качестве неподвижного образца использовались колодки, вырезанные из вкладышей типа «*Rillenlager*» («*Miba*» 33), которые широко применяются на современных среднеоборотных главных и вспомогательных судовых дизелях. Диски для упрочнения были взяты из стали 40X твердостью 230 НВ, т. к. свыше 80 % коленчатых валов судовых дизелей имеют твердость шеек в диапазоне 201–230 НВ. Диаметр диска составлял 45 мм, ширина 10 мм. Смазку пары трения осуществляли капельным способом (5–6 капель в мин). Для смазки применялось работающее моторное масло марки М-14-Д<sub>2</sub> (цл 30) ГОСТ 17479.1–20154.

Нагрузку в процессе триботехнических испытаний изменяли в соответствии с режимами, приведенными в табл. 2.

Таблица 2  
Режимы формирования покрытия и триботехнических испытаний

Нагрузка, Н	100	200	400
Время нанесения покрытия, мин	1	1	1
Время формирования покрытия, мин	5	10	45
Время трибоиспытаний, мин	5	10	45

Износ образцов определяли весовым способом на лабораторных весах с ценой деления 0,1 мг марки *AUW 220D* фирмы *Shimadzu* (Япония).

При нанесении исходного и модифицированного вермикулита наблюдается повышенное изнашивание стали из-за высоких абразивных свойств вследствие наличия в их составе оксида алюминия (табл. 3). Применение бутила и гептила для формирования покрытия на данном этапе позволяет избежать износа поверхности образца (износ стали компенсируется за счет внедрения частиц модификатора в ее поверхностный слой).



Таблица 3

Скорости изнашивания стали 40X на различных этапах формирования покрытия и деталей сопряжения в процессе триботехнических испытаний

№ п/п	Триботехнический материал для формирования покрытия	Скорость изнашивания стали, мг/ч			Скорость изнашивания вкладыша при трибоиспытаниях, мг/ч	Коэффициент трения при максимальной нагрузке
		при нанесении материала	при формировании покрытия	в процессе трибоиспытаний		
1	Вермикулит	64	3,4	0,6	3,5	0,036
2	Вермикулит + HCl	28	1,7	<b>0,1</b>	2,5	0,046
3	Бутил	0	4,1	<b>0,1</b>	1,9	0,043
4	Гептил	0	3,9	<b>0,1</b>	1,4	<b>0,014</b>

В процессе формирования покрытия (время 1 ч) наибольший износ наблюдается при использовании дендримеров (табл. 3) вследствие большего коэффициента трения по сравнению с модифицированным вермикулитом. Следует отметить, что уменьшение содержания кремния и увеличения углерода способствует уменьшению величины коэффициента трения и, соответственно, скорости изнашивания стали в процессе формирования покрытия.

Триботехнические испытания пары трения «шейка вала – вкладыш подшипника» позволили установить, что покрытие, сформированное на стали при использовании карбосилан-силоксановых дендримеров, обеспечивает более высокие эксплуатационные свойства трибосопряжения в условиях трения при граничной смазке по сравнению с исходным или модифицированным вермикулитом – существенно снижается скорость изнашивания вкладыша подшипника (табл. 3), а также меньше коэффициент трения. Следует отметить, что применение гептила для формирования тонкопленочного покрытия обеспечивает лучшие триботехнические и эксплуатационные свойства по сравнению с бутилом благодаря более высокому содержанию углерода и меньшему кремния.

Таблица 4

Изменение коэффициента трения в процессе формирования покрытия и триботехнических испытаний

Триботехнический материал	Время, мин						
	0–5	6–10	11–15	16–20	21–30	31–40	41–60
Формирование покрытия (пара трения «сталь – сталь»)							
Вермикулит + HCl	0,160	0,085	0,043	0,028	0,022	0,029	0,022
Бутил	0,190	0,114	0,114	0,029	0,058	0,074	0,074
Гептил	0,190	0,135	0,135	0,029	0,029	0,043	0,058
Триботехнические испытания (пара трения «сталь – покрытие – вкладыш»)							
Вермикулит + HCl	0,108	0,108	0,086	0,086	0,057	0,022	0,036
Бутил	0,029	0,029	0,028	0,058	0,050	0,043	0,043
Гептил	0,029	0,029	0,029	<b>0,014</b>	<b>0,014</b>	0,022	<b>0,014</b>

Следует отметить, что применение карбосилан-силоксановых дендримеров для формирования покрытий позволяют получить более стабильные величины коэффициента трения при эксплуатации сопряжения в условиях трения при граничной смазке.

Таким образом, применение карбосилан-силоксановых дендримеров в триботехнических целях предпочтительно по сравнению с природными слоистыми силикатами благодаря стабильности химического состава и более высоким эксплуатационным свойствам. Применение гептила, содержащего 68 % углерода и 14 % кремния, обеспечивает наиболее высокие эксплуатационные свойства пары трения «шейка вала – вкладыш подшипника».

## Библиографический список

1. Дунаев А. В. Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК / А. В. Дунаев, В. В. Ладиков, И. Ф. Пустовой, И. Г. Голубев. – Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – 164 с.
2. Колокатов А. М. Ремонтно-восстановительные составы для повышения ресурса машин / А. М. Колокатов. – Москва : Изд-во РГАУ-МСХА, 2016. – 215 с.
3. Леонтьев Л. Б. Триботехнические наноматериалы и надежность судовых дизелей : монография / Л. Б. Леонтьев, Н. П. Шапкин, А. Л. Леонтьев, В. Н. Макаров, А. Г. Токликишвили. – Владивосток : ДВФУ, 2020. – 277 с.
4. Tutov M. V., Sharshina E. A., Karpova E. I., Leont'ev L. B. and Shapkin N. P. Hydroxyl-functionalized alkyl-terminated silsesquioxanes as surface modifiers of friction geomodifiers // Mendeleev Commun., 2018, №28, P. 138–139. DOI: 10.1016/j.mencom.2018.03.008.

## ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ В УСЛОВИЯХ СИБИРИ И КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Лещенко Светлана Леонидовна,  
E-Mail: [lsl24@mail.ru](mailto:lsl24@mail.ru),

Сибирский федеральный университет,  
Институт космических и информационных технологий

**Аннотация.** Изложены результаты проведенных исследований в области дистанционного зондирования с использованием технологий радиолокационного и лазерного обнаружения углеводородного сырья, направленных на поиск, локализацию и топографическую привязку обнаруженных месторождений нефти и газа. Выявлены основные проблемы зондирования. Для определения предельно малых концентраций выделены основные сдерживающие факторы и показана необходимость подавления возникающих на трассе зондирования паразитных помех. С целью формирования требований к чувствительности аппаратуры и точности программных расчетов обоснован выбор модели трассы лазерного пучка. Предложена модификация известной модели для представления трассы лидара на основе метода дифференциального поглощения, с учетом поправочных коэффициентов молекулярного и аэрозольного поглощения и рассеивания.

**Ключевые слова.** Лидар, дистанционное зондирование земли, локализация месторождений нефти и газа, компенсация помех, трасса, математическая модель.

### 1. Введение

Существенной проблемой разведки нефтяных месторождений, в районе Сибири и крайнего севера, является труднодоступность и предельно низкие температуры, что снижает темпы обнаружения новых залежей. Известен ряд подходов для решения обозначенной проблемы [1–3].

Одним из наиболее перспективных является метод разведки, основанный на использовании технологий дистанционного лидарного зондирования приземного слоя с летательного аппарата, что позволяет выявлять предельно малые концентрации углеводородного сырья [4]. Обнаруживая устойчивые области с повышенным содержанием взвешенных веществ в атмосфере, фиксируя локальные выходы природного газа, наблюдая пространственную динамику поверхностных утечек в реальном масштабе времени, появляется возможность осуществлять топологическую привязку предполагаемых месторождений к местности.

Существующие лазерно-локационные методы [5, 6] применяются повсеместно для съемки и обнаружения утечек газопровода и решения топографических задач, что позволяет получать результаты в широком спектре предметных областей. Однако известные методы и аппаратные средства предназначены для определения больших концентраций углеводородов (до 1 ppm) [5]. Однако для локализации предполагаемых месторождений требуется определение предельно малого содержания газа в приземном пространстве.

Решение данной задачи может быть получено при использовании лидара функционирующего на основе метода дифференциального поглощения с высокой избирательной способностью, которая обеспечивается комплексом технических решений [7]. В первую очередь функциональный состав аппаратного обеспечения лидара должен позволять генерировать и эффективно принимать лазерное излучение на соответствующих длинах волн, близких по своим значениям к поглощаемым октанами и исключающих возможность паразитной солнечной засветки. Во вторых, на аппаратном и программном уровне требуется решение задач фильтрации, шумоподавления и выделения принимаемого полезного сигнала с высокой избирательной способностью. Для этого требуется разработка адекватного математического представления трассы распространения лазерного пучка. Такая модель позволит учесть основные факторы, влияющие на точность обработки полезного сигнала, а именно тип ландшафта, рассеивание сигнала, ограничение расстояния приема сигнала.

С целью решения проблем рассеивания сигнала и разработки перечня требований к разрабатываемому комплексу, предложен математический аппарат, описывающий трассу прохождения светового пучка.

## 2. Математический аппарат

По мнению авторов [4–6, 8], наиболее точным для данного случая является следующее представление лидарного уравнения (1):

$$P_{\lambda}(R) = P_0 \eta \left(\frac{c\tau}{2}\right) A(R) \frac{\beta_{\lambda}(R)}{R^2} \exp \left[ -2 \int_0^R \alpha_{\lambda}(x) dx \right] \quad (1)$$

где  $R$  – расстояние до рассеивающего объема;  $c$  – скорость света;  $\tau$  – длительность лазерного импульса;  $P_{\lambda}$  – мощность рассеянного излучения, полученная за время  $t = 2R/c$ ;  $P_0$  – мощность лазера;  $\eta$  – эффективность приемника (калибровочная константа);  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения;  $\beta_{\lambda}$  – объемный коэффициент обратного рассеяния атмосферы;  $A$  – эффективная площадь приемника;  $\alpha_{\lambda}$  – объемный коэффициент ослабления (экстинкции) атмосферы.

Коэффициенты молекулярного рассеяния ( $\beta_{\lambda}^{mol}$ ) и ослабления ( $\alpha_{\lambda}^{mol}$ ) можно рассчитать с хорошей точностью на основе теории рассеяния Рэля [9], либо с использованием конкретной модели атмосферы [8]. Для корректной оценки пропускания лазерного излучения атмосферой необходима информация о физических и оптических моделях атмосферы. Одной из наиболее полных для решения поставленных задач дистанционного зондирования представляется физическая модель атмосферы, разработанная в Институте оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН [5]. В ней, помимо данных о температуре, давлении, концентрации  $H_2O$  и  $O_3$  для различных климатических зон, имеется информация о высотном распределении  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ , а также сведения об их стандартных отклонениях для различных высот.

Теория молекулярного рассеяния света Рэля дает следующее выражение (2) для объемного коэффициента обратного молекулярного рассеяния (в  $cm^{-1} \cdot sr^{-1}$ ) в газах:

$$\beta_{\lambda}^{mol} = \frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \frac{6 + 3\Delta}{6 - 7\Delta} \quad (2)$$

где  $N$  – концентрация молекул;  $n$  – показатель преломления среды;  $\Delta$  – степень деполаризации рассеянного излучения.

Для смеси атмосферных газов на высотах до 100 км выражение (3), описывает объемный коэффициент обратного рассеяния, и будет иметь вид

$$\beta_{\lambda}^{mol} = 5.45 * 10^{-28} N \left( \frac{550}{\lambda} \right)^4 \quad (3)$$

где  $\lambda$  берется в нанометрах.

При рассмотрении однократного молекулярного рассеяния параметр  $\Delta$  связывается с анизотропией поляризации молекул, и в случае изотропных центров рассеяния, например, таких как одноатомные газы типа аргон, он равен нулю (для воздуха  $\Delta = 0,035$ , а для азота  $\Delta = 0,036$ ).

Коэффициенты аэрозольных рассеяния ( $\beta_{\lambda}^{aer}$ ) и ослабления ( $\alpha_{\lambda}^{aer}$ ) можно определить либо теоретически, на основе теории аэрозольного рассеяния (теория Ми) [9], либо экспериментально (из лидарных сигналов), на основе алгоритмов решения лидарного уравнения, которые подробно рассмотрены в ряде работ [10].

Согласно теории рассеяния электромагнитных волн аэрозольными частицами в приближении диэлектрических сфер (теория Ми) можно получить выражения для объемных коэффициентов рассеяния (3) и ослабления (4) при заданной длине волны:

$$\alpha^{aer}(n, \lambda) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{ext}(\rho, n, \lambda) f(r) dr \quad (3)$$

$$\beta^{aer}(n, \lambda) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{scat}(\rho, n, \lambda) f(r) dr \quad (4)$$

где  $r$  – радиус частицы;  $f(r)$  – функции распределения аэрозольных частиц по размерам;  $n$  – комплексный показатель преломления диэлектрической сферы;  $Q_{ext}$  и  $Q_{scat}$  – коэффициенты эффективности рассеяния и ослабления;  $\rho = 2\pi r/\lambda$  – относительный размер частиц.

В [6] аэрозольное ослабление описывается эмпирическим выражением (5):

$$\alpha^{aer} = \frac{3.912}{R_m} \left( \frac{\lambda}{0.55} \right)^q \quad (5)$$

где  $R_m$  – метеорологическая дальность видимости на  $\lambda = 0,55$  мкм.

Величины  $R_m$  для различных условий видимости известны [9], а коэффициент  $q$  задается следующим выражением (6):

$$q = \begin{cases} 0.585(R_m)^{1/3} & \text{при } R_m \leq 6 \text{ км} \\ 1.3 & \text{при } 6 \text{ км} \leq R_m \leq 50 \text{ км} \\ 1.6 & \text{при } R_m \geq 50 \text{ км} \end{cases} \quad (6)$$

При разработке программно-аппаратного комплекса лидара для авиационной платформы (рис. 2) следует учитывать, что параметр  $A(R)$  в уравнении (1) может определяться только характеристиками приемника и передатчика. Он зависит от пространственного распределения мощности в лазерном пучке, а также степени перекрытия лазерного пучка и поля зрения телескопа. Этот фактор учитывает влияние тени вторичного зеркала телескопа, абберации оптической системы, неоднородность поверхности детектора и эффективную площадь телескопа. При определении размера зеркала телескопа следует учесть, что эффективная площадь приемника  $A(R)$  задается следующим выражением (7):

$$A(R) = \frac{A_0}{\pi W^2(R)} \times \int_{r=0}^{r_{max}} \int_{\psi=0}^{2\pi} \xi(R, r, \psi) F(R, r, \psi) r dr d\psi = A_0 \xi(R) \quad (7)$$

где  $F(R, r, \psi)$  – функция пространственного распределения интенсивности лазерного излучения;  $\xi(R, r, \psi)$  – геометрический вероятностный коэффициент;  $\psi$  – азимутальный угол;  $W(R)$  – размер лазерного пятна на расстоянии  $R$ ;  $A_0$  – площадь входной апертуры телескопа;  $\xi(R)$  – функция геометрического фактора (ФГФ) лидара, которая учитывает степень перехвата отраженного от мишени лазерного пучка.

В основе разрабатываемого программно-аппаратного комплекса для управления лидаром используется принцип дифференциального поглощения (ДП), основанный на явлении резонансного поглощения лазерного излучения внутри контура линии поглощения исследуемого газа. Концентрация газа вычисляется при использовании лучевых сигналов на двух близких частотах, одна из которых находится внутри линии поглощения, а другая – вне ее.

Используя лидарное уравнение (1) для упругого рассеяния на длинах волн  $\lambda_{on}$  и  $\lambda_{off}$ , из отношений мощностей отраженных сигналов  $P_{on}$  и  $P_{off}$  на двух длинах волн получаем следующее выражение (8) для концентрации исследуемых молекул:

$$N(R) = -\frac{1}{2\Delta\sigma} \frac{\partial}{\partial R} \left[ \ln \frac{P_{on}(R)}{P_{off}(R)} \right] + \frac{1}{\Delta\sigma} \frac{\partial}{\partial R} \left[ \ln \frac{\beta_{on}(R)}{\beta_{off}(R)} \right] - \frac{\alpha_{on}(R) - \alpha_{off}(R)}{\Delta\sigma} \quad (8)$$

где  $\beta_{on}$  и  $\beta_{off}$  – коэффициенты обратного рассеяния атмосферы на длинах волн  $\lambda_{on}$  и  $\lambda_{off}$ ;  $\alpha_{on}$  и  $\alpha_{off}$  – коэффициенты ослабления атмосферы на волн  $\lambda_{on}$  и  $\lambda_{off}$ ;

$$\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off}) = \sigma_{on} - \sigma_{off} \quad (9)$$

$\Delta\sigma$  – сечение ДП (дифференциального поглощения);  $\sigma(\lambda_{on})$  и  $\sigma(\lambda_{off})$  – эффективные сечения поглощения на двух длинах волн. В случае приземной трассы зондирования  $\sigma(\nu)$  для линии с центральной частотой  $\nu_0$  хорошо описывается Лоренцевским контуром [4–5] показанном в выражении (10):

$$\sigma_L(\nu) = \frac{S}{\pi} \frac{\gamma_L}{\gamma_L^2 + (\nu - \nu_0)^2}, \quad (10)$$

где  $S$ ,  $\gamma_L$  – интенсивность (12) и полуширина (11) линии поглощения соответственно, которые для колебательно-вращательных линий при давлении  $p$  и температуре  $T$  имеют следующий вид:

$$\gamma_L(T, p) = \gamma_L^0 \left( \frac{T_0}{T} \right)^l \frac{p}{p_0} \quad (11)$$

$$S(T) = S_0 \left( \frac{T_0}{T} \right)^m \exp \left[ -E^n \frac{hc}{kT} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (12)$$

где  $\gamma_L^0$  и  $S_0$  – Лоренцевские полуширина и интенсивность при температуре  $T_0$  и давлении  $p_0$ ;  $E^n$  – энергия нижнего колебательно-вращательного состояния;  $h$  – постоянная Планка;  $k$  – постоянная Больцмана;  $m$  и  $l$  – параметры температурной зависимости полуширины и интенсивности соответственно. Параметр  $l$  для различных газов может изменяться от 0,5 до 1, параметр  $m = 1$  для линейных молекул и 1,5 для нелинейных.

Выражение (8) показывает возможность восстановления непрерывного профиля  $N(R)$  при непрерывной записи лидарных сигналов. Однако на практике, лидарные сигналы регистрируются приемной аппаратурой в виде дискретного цифрового массива данных, получаемых через равные промежутки времени  $\Delta t$ , что соответствует пространственному разрешению  $\Delta R = c\Delta t/2$ . Тогда из (8) для сигналов, принятых от атмосферных объектов, удаленных по трассе зондирования на расстояние  $R$  и  $R+\Delta R$ , следует выражение для средней концентрации (13–15) исследуемого газа в указанном интервале расстояний:

$$\bar{N} = -\frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \ln \left[ \frac{P_{on}(R+\Delta R)}{P_{off}(R+\Delta R)} \frac{P_{off}(R)}{P_{on}(R)} \right] - \frac{\alpha_{on}^{mol} - \alpha_{off}^{mol}}{\Delta\sigma} + B_s + E_a, \quad (13)$$

$$B_s = \frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \ln \left[ \frac{\beta_{on}(R+\Delta R)}{\beta_{off}(R+\Delta R)} \frac{\beta_{off}(R)}{\beta_{on}(R)} \right], \quad (14)$$

$$E_a = -\frac{\alpha_{on}^{aer} - \alpha_{off}^{aer}}{\Delta\sigma}. \quad (15)$$

При калибровке приемо-передающей аппаратуры комплекса, длины волн должны выбираться таким образом, чтобы коэффициенты обратного рассеяния и ослабления атмосферы не зависели от длины волны. Поэтому спектральный интервал между двумя длинами волн должен быть так мал, чтобы можно было пренебречь слагаемыми  $V_s$  и  $E_a$ . Тогда выражение для концентрации упрощается:

$$\bar{N} = -\frac{1}{2\Delta\sigma\Delta R} \ln \left[ \frac{P_{on}(R + \Delta R) P_{off}(R)}{P_{off}(R + \Delta R) P_{on}(R)} \right]. \quad (16)$$

На основании вышеизложенного и результатов предварительных экспериментов [11–13] в проблемной области было замечено, что полученное уравнение (16) адекватно описывает зависимость средней концентрации искомого газа от мощности отраженного излучения на двух длинах волн  $\lambda_{on}$  и  $\lambda_{off}$ . При этом  $\lambda_{on}$  находится внутри линии поглощения искомого газа, а  $\lambda_{off}$  – вне ее (рис. 1).

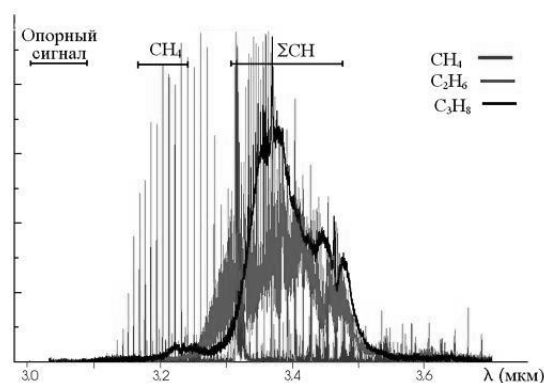


Рис. 1 Спектры определяемых углеводородов и выбранные для измерения их концентраций спектральные интервалы [14]

Для оценки чувствительности разрабатываемой аппаратуры – предельно допустимых значений концентраций атмосферного газа  $N_{min}$ , которые могут быть обнаружены с минимальной погрешностью измерений оптических сигналов удобно воспользоваться формулой предложенной в [6]:

$$N_{min}(R) = \frac{1}{\Delta\sigma\Delta R} \frac{2}{SNR(R)}, \quad (17)$$

где SNR – отношение сигнал/шум на расстоянии R от лидара.

Таким образом, для повышения чувствительности прибора при заданном пространственном разрешении  $\Delta R$  следует выбирать наиболее интенсивные линии поглощения исследуемого газа с максимальным сечением ДП  $\Delta\sigma$ .

### 3. Выводы

Изначальное предположение о принципиальной возможности создания лидара для определения именно предельных концентраций углеводородов в приземном слое подтверждается результатами моделирования. Определено, что предложенная архитектура, основные параметры аппаратуры и метод дифференциального поглощения эффективны для дистанционного зондирования на трассах, не превышающих 200 м.

При настройке лидара на определение газов октановой группы методом дифференциального поглощения следует использовать длины волн, для которых отношение  $\Delta\sigma/\Delta\lambda$  максимально, где  $\Delta\lambda = \lambda_{on} - \lambda_{off}$ .

Из выражения (17) видно, что при значительных отношениях сигнал/шум концентрация  $N_{min}$  ограничивается систематической погрешностью лидара, которая может составлять от 10 до 20 %.

В настоящее время, предложенный для расчета концентрации предельных углеводородов вдоль трассы лидара математический аппарат, требует адекватного алгоритмического представления и моделирования, разработки программного обеспечения для микропроцессорной системы управления лидаром и проведения серии натуральных экспериментов.

#### Библиографический список

1. Jarett Bartholomew, Philip Lyman, Carl Weimer and Lyle Ruppert, Airborne Active Sensing for Pipeline Leak Survey / AIAA SciTech Forum, January 2017.
2. Development of Differential Absorption Lidar (DIAL) for Detection of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and PM in Alberta / Michael Wojcik, Blake Crowther, Robert Lemon and other / Chemical and Biological Sensing Technologies XII. Proc. Of SPIE Vol. 9486. 94860K @2015 SPIE.
3. Давенпорт В. Б. Введение в теорию случайных сигналов и шумов : учебное пособие / В. Б. Давенпорт, В. Л. Рут. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1960. – 467 с.
4. Зуев В. Е. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы / В. Е. Зуев, В. В. Зуев. – Санкт-Петербург : Гидрометеиздат, 1992. – 231 с.
5. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Пер. с англ. – Москва : Мир, 1987. – 550 с.
6. Лазерный контроль атмосферы / Р. Т. Коллис, Э. Д. Хинкли, Х. Инава. – Москва : Мир, 1979. – 416 с.
7. Непомнящий О. В. Математическое и аппаратное обеспечение комплекса геофизических исследований для дистанционного, авиационного зондирования земной поверхности / О. В. Непомнящий, С. Ф. Тэн, В. А. Хабаров // Авиакосмическое приборостроение. № 10. – Москва : Научтехиздат, 2011. – С. 38–43.
8. Зуев В. Е. Оптические модели атмосферы / В. Е. Зуев, Г. М. Креков. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1986. – 256 с.
9. Van de Hulst H.C. Light Scattering by Small Particles. New York : JWS Inc, 1981, 470 p.
10. Kovalev V. A., Eichinger W. E. Elastic Lidar : Theory, Practice and Analysis Methods / New York, JWS Inc., 2004, 615 p.
11. Непомнящий О. В. Метод бездисперсионного абсорбционного измерения концентрации метана на основе аппаратной методики измерителя с открытым оптическим каналом / О. В. Непомнящий, С. Ф. Тэн, В. А. Хабаров // Информационно измерительные и управляющие системы. № 2. Т. 9. – Москва : ЗАО Изд-во «Радиотехника», 2011. – С. 3–7.
12. Lidar beam path model for measuring extremely low concentrations of hydrocarbons in the surface layer. Nepomnyashchiy O., Sirotinina N., Popov D., Leshenko S. Anthology of scientific research papers “Space Engineering, Technologies & Exploration”. ECM Space Technologies GmbH, Berlin, Germany, 2018. pp. 186–190.
13. Математическая модель трассы лидара / С. Л. Лещенко, Д. В. Попов, Д. О. Непомнящий // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – Саратов : Изд. Саратовский гос. технический университет имени Гагарина Ю. А., 2018. – С. 21–24.
14. Roberto Nebuloni Empirical relationships between extinction coefficient and visibility in fog Appl. Opt. 2005. – Vol. 44.

## СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Манин Антон Валерьевич,**

E-Mail: maninanton@mail.ru,

**Илемкова Наталья Рейнгольдовна,**

E-Mail: inr-nt@mail.ru,

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

**Аннотация.** Строительное производство необходимо постоянно обеспечивать исходными координатами для выполнения многочисленных разбивочных работ, исполнительных съемок, контрольно-измерительных работ и мониторинга за состоянием уже возведенных конструкций. В данной статье рассмотрен спутниковый метод определения координат и его применение в строительной практике. Спутниковое позиционирование – принципиально новый метод измерения в геодезии, основанный на применении геодезических спутниковых технологий с использованием Глобальной Навигационной Спутниковой Системы (ГНСС). На сегодняшний день используются две спутниковые системы определения координат – российская система ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система) и американская система NAVSTAR GPS (*NAVigation Satellites providing Time And Rang; Global Positioning System*).

**Ключевые слова.** Координаты, спутник, ГНСС приемники, деформационный мониторинг, автоматизация, строительство.

Спутниковый метод основан на измерении расстояний от спутников до приемника по скорости и времени распространения радиоволн. Спутники движутся по орбитам вокруг Земли, непрерывно передавая информацию о своих пространственных координатах  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Наземные приемники улавливают сигналы от спутников, вычисляют расстояния до них и свои собственные координаты. Для точных измерений при геодезических работах используются несколько приемников, один из которых – базовая станция, устанавливаемая на опорном пункте с известными координатами. На определяемых пунктах устанавливаются *rover*-приемники. Роль базовой станции состоит в определении поправок в координаты *rover*-приемников, работающих в радиусе ее действия. Вычислив собственные координаты по сигналам от спутников, станция формирует корректирующую информацию. Эти поправки передаются в режиме реального времени на все работающие приемники навигационной спутниковой системы на данной территории. При этом точность определения приращений координат составляет  $5 \text{ мм} + D \cdot 10^{-6}$ .

В настоящее время спутниковые методы определения координат используются в первую очередь при создании государственных геодезических сетей, на основе которых выполняется построение геодезической разбивочной основы (ГРО) строительной площадки. ГРО представляет собой сеть геодезических знаков, имеющих плановые координаты своего местоположения  $X$ ,  $Y$  и высотную координату  $Z$ . В свою очередь, ГРО используется для геодезического обеспечения строительного производства.

Так спутниковые приемники могут применяться для обеспечения земляных работ. На бульдозер или автогрейдер устанавливается приемник с трехмерной системой нивелирования. Эта система автоматического управления практически самостоятельно руководит рабочим органом строительной машины, используя в качестве исходных данных загруженную цифровую модель проекта. Возможности системы позволяют создавать отчет о выполненной работе и отправлять его на удаленный сервер.



Основные компоненты 3D систем автоматического управления:

- система, позиционирующая положение рабочего органа машины;
- бортовой компьютер (панель управления), находящийся в кабине;
- программное обеспечение для преобразования цифровых проектов в формат, необходимый для корректной работы системы.

Автоматическое управление машинами на строительных площадках позволяет значительно повысить производительность спецтехники, автоматизировать работу машин, увеличить скорость и точность работ, что ведет к снижению финансовых, временных и трудовых затрат.

Глобальные навигационные спутниковые системы находят применение в высотном строительстве. В качестве примера можно назвать разработанную швейцарской компанией *Leica Geosystems* технологию контроля положения передвижной опалубки возводимого монолитного здания. Известно, что при возведении высотных зданий геодезические работы выполняются среди арматуры, металлоконструкций, материалов и оборудования на монтажном горизонте, при работающих грузоподъемных механизмах и кранах. Подобные факторы осложняют проведение геодезических работ. Предложенный метод дает возможность определять положение фиксированных точек строительных конструкций зданий в удаленном доступе. Было предложено задействовать три комплекта двухчастотных спутниковых геодезических приемников со спутниковыми геодезическими антеннами, установленными на верхе передвижной бетонной опалубки. *GPS*-приемники выполняли измерения в режиме реального времени, при этом обработка информации выполнялась в геодезическом офисе.

Известно, что высотные здания испытывают значительные статические и динамические нагрузки под воздействием ветра, перепадов температур, подвижек грунта, которые могут привести к критическим деформациям несущих элементов и частичному или полному разрушению объекта. Для своевременного выявления развития деформационных процессов ведут деформационный мониторинг, в т. ч. геодезический.

Традиционные методы геодезического мониторинга подразумевают контроль положения объекта с определенной периодичностью. Недостатком такого подхода является отсутствие информации о состоянии объекта между периодами проведения мониторинга, что не позволяет отследить быстроразвивающиеся деформационные процессы. Преимущество динамического мониторинга с использованием глобальных навигационных спутниковых систем состоит в непрерывном характере наблюдений, в т. ч. в режиме реального времени. Суть метода состоит в определении смещений контрольных пунктов относительно базовых, расположенных вне зоны деформаций. На базовой станции устанавливается приемник ГНСС и жестко зафиксированная спутниковая антенна. Спутниковые антенны рабочих станций размещаются на крыше высотного здания в контрольных точках. Вычислительный центр собирает и обрабатывает данные, вычисляя координаты контрольных точек, что позволяет судить о пространственных деформациях здания. В случае нештатных ситуаций существует возможность осуществлять экстренное оповещение заинтересованных служб.

Применение глобальных навигационных спутниковых систем в строительстве сегодня становится все более востребованным. Основные достоинства спутниковых технологий:

- 1) они точны, всепогодны, эффективны, экономичны;
- 2) можно использовать в любой точке Земли;
- 3) одновременное определение трех координат (две плановые и одна высотная);
- 4) не требуется прямой видимости между пунктами;
- 5) уменьшают трудоемкость и сроки проведения работ благодаря автоматизации измерений.

## Библиографический список

1. Гаджикеримов М. К. Применение глобальных навигационных спутниковых систем в высотном строительстве. Журнал NovaInfo № 41–1, [http:// www. Novainfo.ru](http://www.Novainfo.ru).
2. Рекомендации по проведению динамического мониторинга высотных зданий и сооружений с использованием навигационного поля глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). МДС 13-23.2009 /000 «ТЕКТОПЛАН». – Москва : ОАО «ЦПП», 2010. – 28 с.
3. Рекомендации по правилам геотехнического сопровождения высотного строительства и прилегающего пространства. МДС 13-24.2010/000 «Простор», ООО «Тектоплан». – Москва : ОАО «ЦПП», 2010. – 44 с.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

**Матюхин Владимир Ильич,**

E-Mail: [matyhin53@mail.ru](mailto:matyhin53@mail.ru),

**Матюхина Анна Владимировна,**

E-Mail: [a.v.matiukhina@urfu.ru](mailto:a.v.matiukhina@urfu.ru),

**Журавлев Степан Яковлевич,**

**Ямшанова Наталья Владимировна,**

Уральский федеральный университет,

г. Екатеринбург

**Аннотация.** Для организации внутripечного пылеосаждения на печи Ванюкова ОАО «СУМЗ» (г. Ревда) была применена технология с использованием акустических излучателей. Конструкция излучателя включала сопловую трубу, воздушное сопло, резонатор и фокусирующую поверхность. Исходя из площади поверхности ванны расплава печи и рекомендуемых значений удельной акустической мощности для внутripечного пылеосаждения, была рассчитана суммарная звуковая мощность акустического поля. Было определено оптимальное количество и места расположения акустических излучателей.

**Ключевые слова.** Печь Ванюкова, вынос пыли, осаждение пыли, акустический газоструйный излучатель, выход штейна и шлака.

Тепловая работа большинства технологических агрегатов, использующих дисперсные материалы различной крупности или переработку жидкого расплава, характеризуется образованием значительного (до 200–250 г/м<sup>3</sup>) количества пылевых частиц различного гранулометрического состава, налипанием их на внутреннюю поверхность газоходов и элементы печей при ограниченной кинетике развития основных физико-химических процессов. Для снижения потерь исходных и конечных материалов и улучшения экологической обстановки в районе расположения предприятия на пути движения запыленных газов устанавливают последовательно ряд пылеулавливающих устройств (пылеосадительную камеру, циклонную установку, электрофильтр). Несмотря на их относительно высокий КПД улавливания, содержание пылевых частиц в отходящих газах остается высоким. Такое состояние уровня технологии и конструкции печей характеризуется значительной напряженностью работы газоотводящего тракта, установленного на нем технологического оборудования, потерями исходных материалов для основного производства, повышением экологической нагрузки на окружающую среду [1–4].

Одним из наиболее рациональных способов снижения пылевыноса из слоевых технологических агрегатов является улучшение условий движения запыленных потоков на всех технологических этапах при оптимизации газодинамической обстановки в рабочем пространстве. Являясь наиболее крупным источником пыли, рабочее пространство агрегата может быть использовано для внутривспыльного пылеосаждения. При этом уловленные частицы пыли увеличивают количество материалов, участвующих в технологических процессах, повышая их производительность и уменьшая величину тепловых потерь с отходящими газами.

Одним из эффективных и малозатратных способов улучшения показателей работы технологических слоевых установок или их отдельных частей является использование нестационарных газовых потоков на основе использования энергии акустического поля и их заданных пульсаций, формируемых непосредственно в месте использования.

Основной для разработки таких процессов являются теоретические положения при формировании импульсных энергетических воздействий рациональной мощности на обрабатываемые материалы с учетом трансформации энергетических полей, оценки степени проявления физико-химических эффектов, инверсии их применения в изменяющихся внешних условиях существования объектов.

Правильно выбранное импульсное энергетическое воздействие и эффективное проявление возникающих эффектов интенсификации основных процессов является основой для создания энергоэффективной и экологически чистой технологии.

Внешнее акустическое поле или поле газовых пульсаций, создаваемых в гомогенном пространстве, является источником вибрационного воздействия на движущиеся частицы пыли или кусковые элементы шихты. Это происходит вследствие локального периодического изменения газового давления в движущемся потоке от положительного до отрицательного. Избыточное давление газов между частицами, вызванное внешними колебаниями, компенсируется оттоком избыточного или недостающего количества газов в направлении распространения колебаний. При этом происходит возникновение дополнительного потока газовой среды, что способствует интенсификации тепломассообменных процессов на 10–15 %.

При наличии резонанса частот внешнего акустического поля и собственной частоты частиц пыли, вследствие колебаний твердых частиц, амплитуда которых определяется исходными параметрами акустического поля, имеет место возникновение низкочастотных мелкомасштабных контуров движения частиц без отклонения их от первоначальной траектории движения (рис. 1). На каждую твердую частицу запыленного потока плотностью  $\rho$ , находящуюся в поле внешних акустических или пульсирующих колебаний амплитудой  $A$  и угловой частотой  $\omega$  в газовой среде со скоростью звука  $c$ , действует суммарное давление

$$P = P_0 + A \cdot \rho \cdot c \cdot \omega \cdot \cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right), \text{ атм.}$$

При этом помимо общего давления движущегося газа  $P_0$  во внешнем акустическом поле с уровнем звука  $J$  действует дополнительная периодическая сила с амплитудой колебаний

$$P_a = A \cdot \rho \cdot c \cdot \omega = \frac{\rho \cdot c \cdot \omega}{\omega} \sqrt{\frac{2J}{\rho \cdot c}} \cdot 10^7 = \sqrt{2J\rho c}, \text{ атм.,}$$

величина, которой можно изменять через конструктивные и технологические параметры процесса с изменением величины входных воздействий. Последние вызывают разрушение пограничного слоя около колеблющихся частиц и появлением дополнительных конвективных потоков в среде движущейся газовой среды.

В разряженных средах могут возникать крупномасштабные контуры циркулирующих групп частиц, которые приводят к появлению поршневого эффекта. Явление поршневого эффекта проявляется в образовании около периодически

движущихся частиц локального вакуума, что вызывает образование дополнительных конвективных потоков. Абсолютные значения локального давления и разрежения вблизи отдельных частиц зависят от их размера, частоты и амплитуды колебаний. При этом частота пульсаций внешнего поля должна совпадать с собственной частотой колебаний основной массы частиц. Экспериментальные замеры локальных давлений в слое на примере виброкипящего слоя показали возможность достижения его величины до 20000 Па.

Наиболее ощутимо этот эффект проявляется в условиях тех технологических процессов, где имеют место малые значения скоростей движения газов, а газовый поток отличается повышенным содержанием пыли. Чем больше поперечный размер частиц, тем больше уровень создаваемого разрежения. Поэтому при формировании акустического или пульсирующего полей заданных параметров будет происходить перемещение мелких частиц к крупным, вокруг которых образуется локальная зона повышенного разрежения, формируя вокруг них область с увеличенной концентрацией мелких пылевых элементов. При длительном воздействии периодических колебаний это обеспечивает возможность удержания пылевидных фракций вокруг крупных частиц, сокращая пылевынос на величину до 20–25 %. При этом обязательно необходимо учитывать фактор времени действия акустического поля.

Процесс акустической или пульсационной коагуляции пылевых частиц наиболее эффективно будет проявляться при организации ее непосредственно в рабочем пространстве технологического агрегата. Однако этот процесс требует индивидуального подхода.

При реализации внутриагрегатного пылеосаждения необходимо осуществление следующих принципов.

1. Наиболее полное и непрерывное воздействие внешних колебаний на запыленную среду. Для этого, в соответствии с конструктивными особенностями агрегата, определяют места установки источников нестационарного воздействия с возможностью максимального воздействия на запыленный поток или дисперсную среду.

2. Необходимость реализации временного фактора акустического воздействия на запыленный поток.

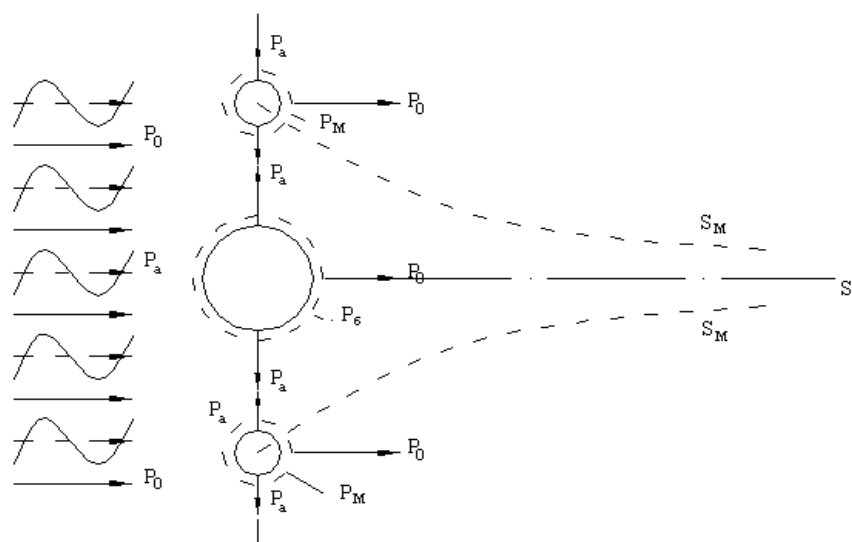


Рис. 1 Схема акустического воздействия на твердые элементы слоя:  $P_0$  – статическое давление газового потока;  $P_a$  – акустическое давление;  $P_M$  – разрежение около малых элементов;  $P_B$  – разрежение около больших элементов;  $S_M$  – траектория движения малых элементов;  $S_B$  – траектория больших элементов

3. Формирование акустического поля заданных параметров, установленных в соответствие с конструктивными особенностями агрегата и физико-химическими характеристиками пылевых частиц. Для этого устанавливают расчетным и экспериментальным путем оптимальные конструктивные и технологические параметры акустических газоструйных излучателей или пульсаторов газовых потоков, обеспечивающих максимальное развитие требуемого технического эффекта (снижение пылевыноса, интенсификация тепломассообменных процессов, разрушение пылевых наростов и настилей и т. д.).

4. Промышленные испытания использование энергии акустического поля или пульсирующих газовых потоков с оценкой эффективности пылеосаждения и развития тепломассообменных процессов.

Формирование акустического поля в слое предлагается осуществлять при помощи акустического излучателя (рис. 2, 3) с применением волноводов различной конструкции или механических пульсаторов с учетом свойств транспортируемой среды.

Акустический излучатель представляет собой разновидность газодинамического свистка Гартмана и состоит из сопла, резонатора и фокусирующей плоскости, выполненных из металла. Питание его осуществляют компрессорным воздухом давлением не ниже 3,0 атм. в количестве до 50 м<sup>3</sup>/ч. Установка этого устройства производится за пределами рабочего пространства, что облегчает его монтаж, обслуживание и эксплуатацию, а также снижает требования к материалам, из которых он изготавливается. Использование же акустического поля непосредственно в рабочем пространстве технологического агрегата делают его безопасным для обслуживающего персонала.

В условиях ограниченного по технологическим причинам импульсно-энергетического воздействия на объекты интенсификации с требуемой низкой частотой колебаний (большие объемы рабочего пространства, низкие скорости движения газовых потоков, ограниченная температура процесса) создаются реальные предпосылки для применения потока пульсирующего дутья. Передача механической энергии колебаний в этом случае может быть реализована в основном через динамические усилия движущегося как всего газового потока с периодически изменяющейся величиной, так и его части, сливающейся с основным потоком в пределах рабочего пространства [5–10].

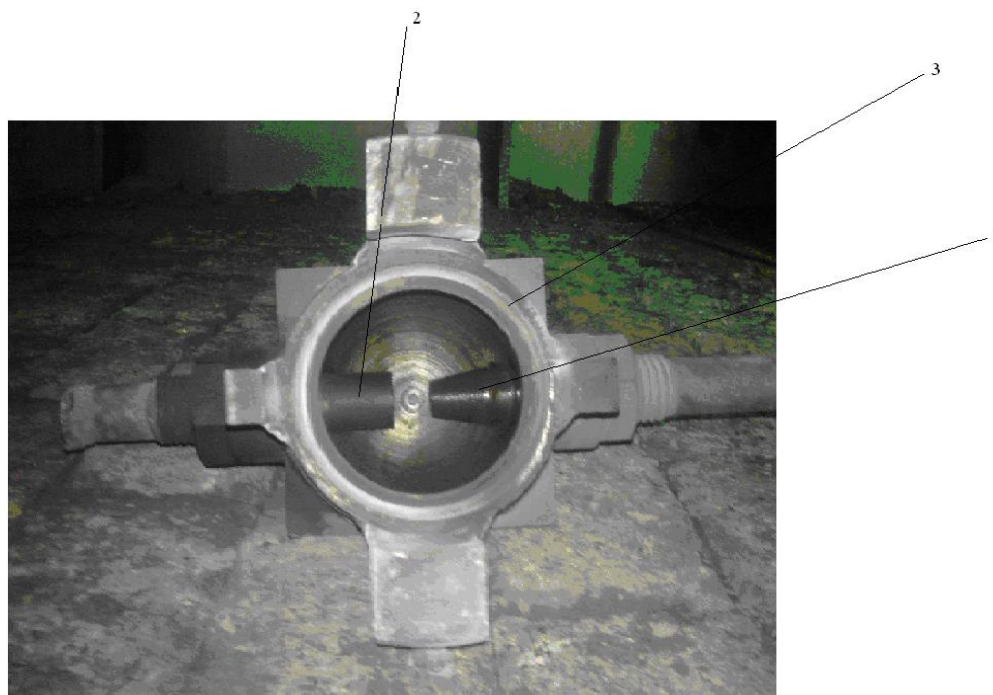


Рис. 2 Акустический излучатель: 1 – сопло; 2 – резонатор; 3 – фокусирующая плоскость

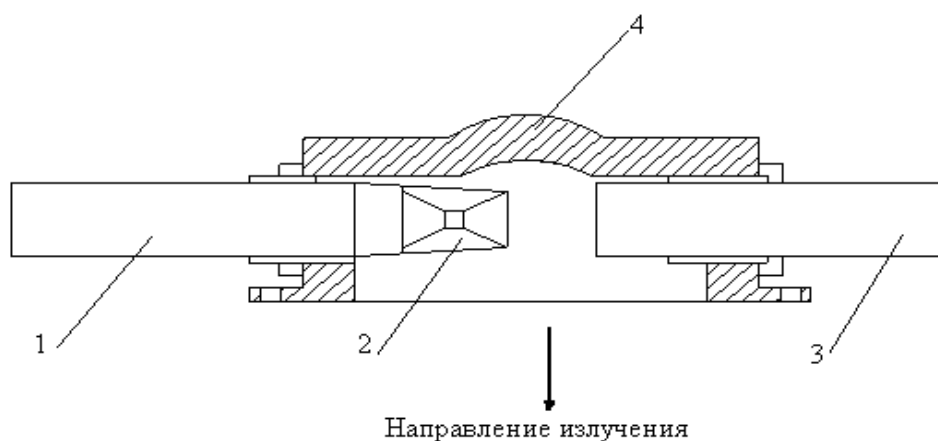


Рис. 3 Конструкция акустического излучателя: 1 – сопловая труба; 2 – воздушное сопло; 3 – резонатор; 4 – фокусирующая плоскость

В зависимости от величины массового пульсирующего потока изменяется общий характер развития колебательного движения газов, энергетической эффективности их использования, величина затрат энергии для их генерации. При колебаниях всей массы газового потока возникают большие инерционные нагрузки, которые ограничивают масштабы применения этого способа. Вторая разновидность пульсирующего потока с использованием только части движущихся газов может оказаться более привлекательна, но с проявлением в меньших пределах изменения эффективности воздействия. Возникающие при этом колебания газовой среды внутри системы ускоряют течение технологического процесса. Однако пониженная величина получаемого эффекта воздействия ограничивает диапазон изменения частоты колебаний не выше 50 Гц.

Промышленные испытания использования энергии акустического поля для интенсификации тепломассообменных процессов на ряде технологических агрегатов (агломашина, плотный слой печи полимеризации, чугунолитейные и минераловатные вагранки, шахтный агрегат цветной металлургии) показали широкие возможности применения этого способа.

Так промышленные испытания этого процесса в условиях агломашины АК-50 Серовского металлургического завода в течение длительного времени подтвердили безопасность его использования. Кроме того, была показана возможность увеличения производительности агрегата на величину до 15...20 %, повышения глубины протекания основных физико-химических реакций в слое, снижения вредных выбросов из агломашины (СО, NO<sub>x</sub>, пыль), уменьшения удельного расхода топлива на процесс на 10...15 %.

На печи полимеризации волокнистых материалов в зависимости от ее конструкции было изготовлено и смонтировано от двух до шести излучателей в камерах вакуумирования и сушки. Их испытания показали возможность увеличения производительности агрегата на 30...35 % с улучшением качества использования органического связующего.

Результаты использования энергии акустического поля в рабочем пространстве чугунолитейных и минераловатных вагранок, шахтных агрегатов цветной металлургии (г. Кировград) показали возможность увеличения производительности плавильных агрегатов на величину 10...15 % при соответствующем снижении расхода кокса и объема вредных выбросов на величину до 20–25 %. При этом отмечается также разрушение образующихся настывей при движении газов и материалов, что повышает производительность плавильного агрегата и уменьшает затраты на его обслуживание.

Формирование поля звуковых колебаний заданных параметров в движущемся запыленном потоке мелкодисперсной шихты вращающихся печей глиноземного производства Богословского алюминиевого завода диаметром 3 м длиной 60 м, как

в направлении движения газов, так и в противоположную сторону позволили установить устойчивую тенденцию снижения пылевыноса за пределы рабочего пространства на величину до 40 %. При этом наблюдалось более полное завершение всех химических преобразований в твердых компонентах, с разрушением образующихся настывей на внутренней поверхности барабана.

Замеры состояния окружающей среды в районе испытаний позволили установить незначительное изменение условий работы обслуживающего персонала по уровню звукового давления [11–16].

Анализ данных промышленных испытаний использования энергии акустического поля в рабочем пространстве ПЖВ (СУМЗ г. Ревда) показал, что, при примерно одинаковых расходных характеристиках исходных компонентов, применение энергии акустического приводит к снижению выноса пыли на 10,94 %. При этом внутриспечное осаждение пыли приводит к возрастанию выхода штейна примерно на 406 кг/ч и шлака на 1299 кг/ч. При среднем содержании меди в штейне 51,7 % это обеспечивает возможность увеличения количества получаемой меди на величину до 210 кг/ч.

Результаты испытаний на конвертере № 2 ОАО «СУМЗ» с использованием энергии акустического поля двух излучателей с давлением 3,0 атм., установленных в пылевой камере, и двух излучателей на входе в циклоны в табл. 3 показали, что в первый период конвертирования расплава общая степень пылеочистки газов возрастала до 56–72 %. Во втором периоде степень пылеосаждения с использованием акустических излучателей увеличивалась в среднем на 22 %.

Если система пылеочистки связана непосредственно с технологическим агрегатом путем циркуляции газов или пылевых компонентов, то эффект акустического воздействия на отдельные ее устройства могут оказывать существенное влияние на условия работы всего процесса. Так при установке акустических излучателей на входном патрубке циклона обжиговой многоподовой печи ОАО «СВЯТОГОР» его суммарный КПД изменялся по сравнению с обычным режимом с 57,14 до 70,49 %, т. е. на 13,35 абс.% или на 23,36 отн.% за счет коагуляции пыли непосредственно при движении газового потока в рабочем пространстве циклона.

Для оценки изменения условий пылеосаждения в пылевой камере вельцпечи и очистки теплообменных поверхностей котла на отходящих газах (ОАО «Челябинский цинковый завод») акустические излучатели устанавливались на пылевой камере в торцовой стенке навстречу движению газов, а на теплообменных поверхностях котла – в верхней области подъемного канала против движения газов. Было показано, что при прочих равных условиях использование энергии акустического поля позволяет увеличить выход оборотной пыли на 8,74 % за счет интенсификации процесса внутриагрегатной коагуляции в осадительной камере на величину до 25–30 %, выход вельюкиси на 2,99 % за счет снижения гидравлического сопротивления пылевой камеры и котла при увеличении действительной скорости движения газов.

Таким образом, при воздействии внешнего акустического поля заданных параметров или пульсирующего газового потока на запыленный поток возникают условия для сближения крупных и мелких частиц и обеспыливания отводимых газов непосредственно в рабочем пространстве технологических агрегатов или их отдельных зон. Практика использования этого процесса на ряде объектов показала, что каждое место установки излучателя позволяет снизить поток пыли примерно на 20–25 % от исходного. При этом возможно также разрушение образующихся пылевых отложений (полностью или частично).

Незначительные капитальные и эксплуатационные затраты при использовании энергии акустического поля и пульсирующего газового потока для организации внутриагрегатного пылеосаждения открывает перспективы для улучшения экологической обстановки в районе работы слоевых агрегатов различных конструкций и совершенствования их энергетики.

## Библиографический список

1. Гущин С. Н. Теплотехника и теплоэнергетика металлургического производства / С. Н. Гущин, А. С. Телегин, В. И. Лобанов, В. Н. Корюков. – Москва : Металлургия, 1993.
2. Ванюков А. В. Комплексная переработка медного и никелевого сырья / А. В. Ванюков, Н. И. Уткин. – Челябинск : Металлургия, 1988.
3. Han, Feng., Yu, Fei., Cui, Cui, Zhaojie. Industrial metabolism of copper and sulfur in a copper-specific eco-industrial park in China//*Journal of cleaner production*. October 2015. Vol.133 P. 459–466.
4. Набойченко С. С. Процессы и аппараты цветной металлургии: учебник для вузов / С. С. Набойченко, Н. Г. Агеев, А. П. Дорошкевич [и др.] ; под ред. С. С. Набойченко. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2005.
5. Ярошенко Ю. Г. Использование энергии акустического поля для улучшения показателей работы шахтных печей / Ю. Г. Ярошенко, О. В. Матюхин, А. М. Паньшин, И. С. Коновалов // *Цветные металлы*. – 2013. – № 8. – С. 64–70.
6. Vaisburd S., Berner A., Brandon D. G., Kozhakhmetov S., Kenzhaliyev E., Zhalelev R. Slags and mattes in Vanyukov's process for the extraction of copper // *Metall. Mater. Trans.* 2015. Vol. 33. No. 4. – P. 551–559.
7. Chen L., Bin W., Yang T., Liu W., Bin S. Research and industrial application of oxygen-rich side-blow bath smelting technology // *Proc. of 4th Int. Symp. on High-Temperature Metallurgical Processing (TMS 2013). Annual Meeting and Exhibition (San Antonio, TX, United States, 3–7 March 2013)*. 2013. – P. 49–55.
8. Asanov, D. A., Filyanova, L. A., Zapasnyi, V. V., Sukhova, N. M. Study of the Performance Indices of a Dust-Cleaning System at the Balkhash Copper Smelter//*Metallurgist*. 2016. – No. 3–4. – P. 331–338.
9. Zhang, H. L., Zhou, C. Q., Bing, W. U., Chen, Y. M. Numerical simulation of multiphase flow in a Vanyukov furnace//*Journal of the southern African institute of mining and metallurgy*. 2015. Vol.115 No. 5 – P. 457–463.
10. Кутателадзе С. С. Тепло и массообмен в звуковом поле / Под ред. С. С. Кутателадзе. – Новосибирск : СО АН СССР, 1970.
11. Серегин П. С. Исследование газовой динамики внутрипечного пространства, пылевыноса и насталеобразования в печи Ванюкова с использованием метода физического моделирования : дис. насоиск. уч. ст. канд. техн. наук по специальности 05.16.02. – Санкт-Петербург : Институт Гипроникель, 2001.
12. Селиванов Е. Н. Вещественный состав пыли электрофильтров печи Ванюкова ОАО «Среднеуральский медеплавильный завод» / Е. Н. Селиванов, Г. В. Скопов, Р. И. Гуляева, А. В. Матвеев // *Металлург*. – 2014. – № 5. – С. 92–95.
13. Кардашев Г. А. Физические методы интенсификации процессов в химической технологии / Г. А. Кардашев. – Москва : Химия, 1990.
14. Коновалов И. С. Совершенствование тепловой и газодинамической работы шахтных медеплавильных печей. Дис. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук по специальности 05.16.02. Екатеринбург : «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», 2012.
15. Cafiero G., Greco C. S., Astarita T., Discetti S. Flow field features of fractal impinging jets at short nozzle to plate distances // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2016. No. 78. P. 334–344.
16. Andrade M.A.B., Skotis G.D., Ritchie S.B, Cumming D.R.S., Riehle M.O., Bernassau A.L. Contactless acoustic manipulation and sorting of particles by dynamic acoustic fields // *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr.* 2016. Vol. 63. Iss. 10. P. 1593–1600.



## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ СЛОЕВЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛОЕВОГО СПОСОБА СЖИГАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

**Матюхин Владимир Ильич,**

E-Mail: [matyhin53@mail.ru](mailto:matyhin53@mail.ru),

**Матюхина Анна Владимировна,**

E-Mail: [a.v.matiukhina@urfu.ru](mailto:a.v.matiukhina@urfu.ru),

**Дудко Вячеслав Анатольевич,**

E-Mail: [v.a.dudko@urfu.ru](mailto:v.a.dudko@urfu.ru),

Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** При нагреве кусковых материалов существуют такие затруднения, как плохо организованный процесс слоевого сжигания, ухудшение условий создания газовой смеси, ограниченный отвод продуктов сгорания из слоя вследствие появления дополнительного газодинамического сопротивления при движении газов. Все это связано с наличием продуваемой кусковой насадки на пути движения газов.

Слоевое сжигание газообразного топлива возможно осуществить в плотном слое кусковых материалов, имеющих различный химический и гранулометрический состав. Для этого необходимо обеспечить формирование высокотемпературной зоны и завершение процесса теплогенерации непосредственно между отдельными элементами обрабатываемых материалов, что позволит обеспечивать заданные температурно-временные условия тепловой обработки различных участков слоя. Также требуется ограничить прямой контакт зоны высоких температур с внешними границами рабочего пространства агрегата и окружающей средой для повышения надежности и эффективности.

В данной работе представлены существующие схемы теплообмена в слоевых технологических агрегатах при тепловой обработке кусковых материалов. Показана возможность слоевого сжигания газообразного топлива при организации подачи в плотный слой предварительно подготовленной газовой смеси либо отдельной фурменной подачи газа и воздуха отдельными потоками. Использование данных способов подачи позволяет снизить энергозатраты и улучшить качество получаемой продукции.

**Ключевые слова.** Слоевой способ сжигания, газообразное топливо, шахтные агрегаты, теплообмен.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования промышленных теплотехнологических процессов и агрегатов показывают, что использование при организации их тепловой работы газообразного топлива в качестве основного источника теплоты и технологических добавок существенно повышают технико-экономические показатели реализации высокотемпературных процессов [1–5]. Это в первую очередь относится к слоевым технологическим агрегатам, использующих различные схемы теплообмена между газами и материалами [6].

Наиболее распространенный способ факельного сжигания газообразного топлива при нагреве кусковых материалов, осложненный наличием на пути движения газов продуваемой кусковой насадки, которая способствует переводу факельного горения газообразного топлива в плохо организованный процесс слоевого сжигания, ухудшает условия создания исходной газовой смеси, вызывает затруднения ее предварительного прогрева до температуры воспламенения горючей части, ограничивает отвод продуктов сгорания из слоя вследствие появления дополнительного газодинамического сопротивления при движении газов.

Исследования теплофизических особенностей слоевого способа сжигание газообразного топлива [7] показали возможность его осуществления в плотном слое кусковых материалов практически любого химического и гранулометрического составов. Отличительной особенностью реализации этого процесса является непосредственное участие при формировании высокотемпературной зоны в плотном слое нагреваемых материалов твердой поверхности кусков шихты [8], что позволяет относительно просто обеспечивать заданные температурно-временные условия тепловой обработки различных участков слоя, завершая процесс теплогенерации непосредственно между отдельными элементами обрабатываемых материалов. Ограничение прямого контакта зоны высоких температур с внешними границами рабочего пространства агрегата и окружающей средой повышают надежность и эффективность использования такого способа отопления слоевых установок. Занимая по физическим показателям (температура, скорость нагрева, состав газовой фазы) промежуточное место между факельными и плазменными процессами, этот способ теплогенерации требует предварительной подготовки исходной смеси воздуха и природного газа, которая включает в себя гомогенизацию ее состава и предварительный подогрев.

Процесс сжигания исходной газозвушной смеси в плотном слое кусковых материалов следует отнести к микрофакельному горению, осложненному присутствием твердых компонентов конечных размеров, заполняющих объем рабочей камеры.

При организации подачи исходных газовых потоков непосредственно в обжигаемый слой кусковых материалов различной степени дисперсности возможно реализация двух вариантов:

- подача подготовленной смеси газа и воздуха, предварительно созданной в специальных смесителях, что характерно для реализации процесса теплогенерации в ограниченном объеме нагреваемого слоя (обжиг окатышей, процесс зажигания аглошихты и др.);

- подача газа и воздуха отдельными потоками при их фурменной подаче в шахтных агрегатах.

Первоначальный тепловой импульс для устойчивого воспламенения газообразного топлива в слое может быть осуществлен с помощью факела открытого огня, электрической искры, струи горячего газа, нагретой поверхностью. Наиболее радикальным путем для обеспечения условий зажигания газообразного топлива является повышение температуры поверхности используемого слоя в режиме предварительного подогрева от внешнего источника энергии.

В соответствии с теорией воспламенения горючей газовой смеси, условия ее зажигания определяются динамикой предварительного подогрева пограничного слоя на лобовой части кусков, в котором передача теплоты осуществляется, в основном, теплопроводностью [9].

В первую очередь на твердой поверхности адсорбируются молекулы кислорода, которые относительно равномерно распределяются по ней независимо от природы самой поверхности. При этом наличие дополнительного теплового сопротивления слоя адсорбированного кислорода на поверхности слоевых частиц требуют повышенного градиента температур между кусковыми материалами и газовыми молекулами смеси. Поэтому уровень предварительного подогрева слоя для организации слоевого горения газа должен быть выше температуры воспламенения исходной газозвушной смеси (500–550 °С). По практическим данным его значение должно составить 800–1050 °С. Несмотря на значительную величину выделяющейся при горении топлива теплоты, наличие оттока тепла на нагрев элементов слоя и конвективный поток с отходящими газами ограничивают общий рост температуры системы.

Повышенная адсорбционная активность молекул кислорода к твердой поверхности слоя снижает их концентрацию в межкусковом пространстве на начальном участке движения газозвушной смеси. Поэтому для обеспечения требуемых концентрационных

соотношений между горючими компонентами и кислородом в газовой смеси при ее воспламенении необходимо обеспечивать в ней значительно больший по сравнению с факельным режимом горения расход воздушного дутья. При этом для устойчивого зажигания газовой смеси в плотном слое целесообразно поддерживать коэффициент расхода воздуха не ниже 2,5–3,0.

Процесс горения газообразного топлива в слое кусковых материалов представляют последовательно проходящими стадиями теплообмена (рис. 1). Газо-воздушная смесь при подаче в предварительно разогретый слой кусковых материалов нагревается, охлаждая его. После достижения газовой смесью температуры воспламенения, которая определяется не только ее исходным составом, но и условиями подогрева, происходит образование активной зоны горения, характерной особенностями которой являются высокая температура и повышенная скорость окисления углеводородов с возможностью перемещения процесса горения по всему слою. Образующиеся при сжигании газа продукты горения, перемещаясь через относительно холодную часть слоя, осуществляют ее подогрев. Этим создаются условия для распространения горения газа по высоте кусковой насадки.

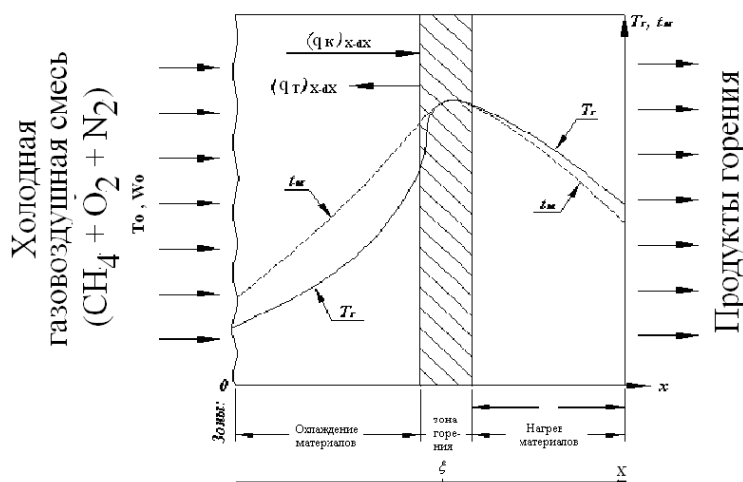


Рис. 1 Схема теплообмена при горении газа в слое:  
 $T_r$ ,  $t_m$  – температура газа и материала;  $X$  – текущая координата зоны горения

Температурный уровень зоны горения определяется условиями теплообмена в зоне охлаждения слоя потоком исходных газов, активностью интенсивного тепловыделения от окисления углеводородов непосредственно в активной зоне горения и развитием конвективного потока отходящих газов.

Формирование зоны горения природного газа в плотном слое кусковых материалов обеспечивается равенством удельных тепловых потоков теплопроводностью от слоевых элементов  $(\sum q_{T_i})_{\xi-dx}$  до зоны горения с координатой  $\xi$ , тепловыделений в ней  $(b \cdot Q_n^p)$  от окисления углеводородов и конвективного теплового потока газов  $(\sum q_{k_i})_{\xi+dx}$  в направлении нагреваемого слоя:

$$(\sum q_{T_i})_{\xi-dx} = (b \cdot Q_n^p) + (\sum q_{k_i})_{\xi+dx}, \quad (1.3)$$

где  $q_T$  – удельный тепловой поток теплопроводностью в сторону исходной газовой смеси, кДж/ч;

$b$  – удельный расход топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$Q_n^p$  – теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>;

$q_k$  – удельный тепловой поток конвекцией в направлении движения отходящих газов, кДж/ч.

Нарушение этого равновесия определяет направление перемещения зоны слоевого сжигания топлива по слою. При превышении удельным тепловым потоком теплопроводностью величины удельного конвективного теплового потока процесс слоевого горения газа будет перемещаться в сторону исходной газовой смеси. В противном случае высокотемпературная зона горения распространяется в направлении движения газового потока.

Использование подготовленной газовой смеси при слоевом способе сжигания ограничивает распространение зоны горения газа в слое протяженностью не более 30–60 мм [10] в непосредственной близости от входа используемых газов в разогретый слой (на расстоянии не более 5–25 мм) [11] со скоростью перемещения 8–16 мм/мин при достижении температуры в ней не выше 1150–1350 °С [12]. Это открывает возможность для снижения энергозатрат на развитие слоевых процессов на 10–15 % при улучшении качественных показателей получаемой продукции.

При фурменной подаче воздушного дутья в рабочее пространство слоевого агрегата и соосной струйной подаче в него газообразного топлива под повышенным давлением вытекание газовых струй из сопел (рис. 2, а) осуществляется отдельными потоками при различной степени перемешивания их между собой и способствует распространению условий движения газов в пространстве, заполненном газовой средой с такими же физическими свойствами, какие имеет вещество струи, в виде отдельных струйных факелов. При этом каждый газовый компонент предварительно находится в устойчивом молекулярном состоянии. При наличии на пути распространения струи газопроницаемой насадки кусковых материалов, характер движения струйных процессов существенно изменяется при турбулизации газовых потоков, сокращении дальности факелов и увеличении угла их раскрытия в пределах 17–32 градусов.

Согласно теории развития турбулентных одиночных и соосных струй, газовая среда, вытекающая из сопла с высокой скоростью [13], обеспечивает эжектирование в движущийся поток окружающей среды, как вдоль внешних, так и внутренних границ струйного течения. Поскольку внутри струи нет среды для удовлетворения ее эжектирующих потребностей, то давление в этой зоне падает и внутри кольцевого пространства между потоками возникают циркуляционные вихри, направленные вдоль струи к ее началу. Это обеспечивает стабильность условий перемешивания газовых компонентов и воспламенения образующейся смеси.

Первоначальный тепловой импульс для устойчивого воспламенения газообразного топлива при организации режима слоевого сжигания природного газа в плотном слое осуществляется за счет предварительного разогрева слоя внешним источником тепла.

Источник воспламенения должен располагаться вблизи входа газовых струй в нагреваемый слой. Чем ближе к входу располагается зона воспламенения газовой смеси, тем более равномерно будет распределение температуры в зоне слоевого горения. Протяженность зоны подогрева должна обеспечить постоянный подогрев газовой смеси до температуры воспламенения, при которой тепловыделения превысят теплопоглощения в слое.

Несмотря на значительную величину выделяющегося при горении топлива потока тепловой энергии, наличие стока тепла на нагрев компонентов слоя и конвективный поток с отходящими газами ограничивают рост температуры в слое не выше 1150–1350 °С [14].

Изменение условий подачи и перемешивания спутных струй открывает возможность регулирования условий распространения газовой смеси по глубине слоя в широких пределах [15–17]. При этом протяженность распространения струйных процессов в кусковой насадке будет зависеть от условий перемешивания центральной высокоскоростной газовой струи с кольцевым потоком воздуха, подаваемого с пониженной скоростью, а также потока газов из окружающей среды. Формирование требуемого начального состава газовой смеси, ее перемешивание, воспламенение и распространение в объеме обжигаемой части слоя будет происходить в пограничной

области развития общего факела. При этом дальнобойность распространения высокотемпературной зоны горения в направлении истечения газов определяется в основном кинетической энергией газовой струи.

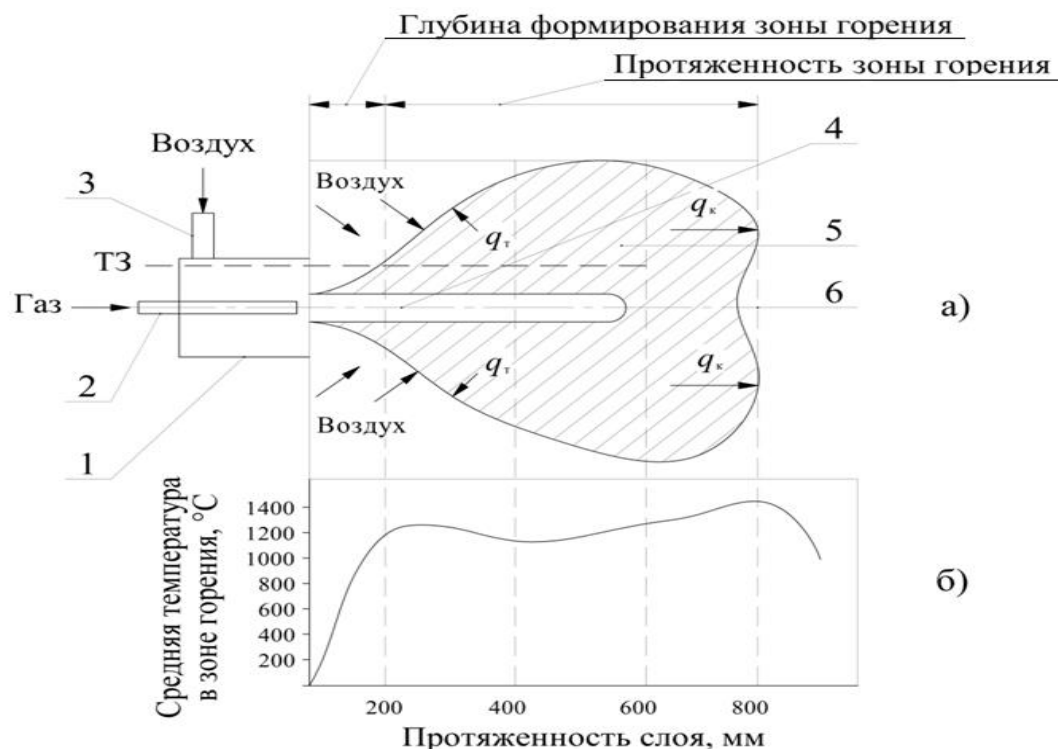


Рис. 2 Схема развития процесса сжигания газа в слое при фурменной подаче газовых компонентов (а): 1 – корпус горелки; 2 – газовое сопло, 3 – воздушный патрубкок; 4 – газовая струя; 5 – зона горения газовойоздушной смеси в слое; 6 – продукты горения; ТЗ – температурный зонд; (б) – изменение температуры слоя при коэффициенте расхода воздуха 1,52 и скорости выхода газов из горелки 2,97 м/с

Отсутствие кислорода по оси центральной части горелочного устройства переводит процесс слоевого сжигания в зональный. В центральной части общего газового потока располагается холодная струя природного газа (рис. 2, а (4)). В периферийной ее части формируется газоздушная смесь за счет подсоса сопутствующего потока воздуха (рис. 2, а (3)). Наличие на пути ее движения предварительно разогретого слоя с температурой 800–1050 °С на входе газовой смеси в слой шихты приводит к подогреву потоков природного газа и воздуха со смещением области повышенных температур к периферийной части факела. В результате образуется зона горения (рис. 2, а (5)), в которой совершаются процессы генерации тепловой энергии. При этом в центральной части газового факела находится высокоскоростной поток природного газа, химический состав которого остается близким к составу газа на срезе сопла (рис. 2, а (2)). По периферии зоны горения располагается область, сформированная в результате смешивания природного газа, воздуха и продуктов горения. Протяженность этой зоны в горизонтальном направлении определяется условиями перемешивания природного газа с воздухом и условиями зажигания газовойоздушной смеси. Образующиеся при сжигании газа продукты горения, перемещаясь через относительно холодную часть слоя шихты, создают за пределами зоны в направлении движения газовойоздушной смеси условия для дожигания газа в плотном слое кусковых материалов за счет эжектирования воздушного потока из окружающей среды.

Таким образом, использование процесса слоевого горения природного газа при нагреве кусковой насадки может приобретать объемный характер и охватывать значительную часть его рабочего пространства при обеспечении общего расхода топлива

на высокотемпературный обжиг на уровне не более 140 кг усл. т/т. Наличие повышенных температур нагрева исходной газовой смеси в слое при недостатке кислорода открывает также возможность для развития газокислородной конверсии метана с образованием потока восстановительных газов CO и H<sub>2</sub>.

#### Библиографический список

1. Лисиенко В. Г. Хрестоматия энергосбережения / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев; под ред. В. Г. Лисиенко – Москва : Теплоэнергетик, 2002. – 768 с.
2. Hannes Piringer, Lime Shaft Kilns. Energy Procedia Volume 120, August 2017, Pages 75–95.
3. Hui Dong, Jiu-juCai, Guo-sheng Wang, et al. Experimental Study on Gas Flow Distribution Affected by Constructional Parameters of Pelletizing Shaft Furnace. Journal of Northeastern University (Natural Science), 24 (6) (2004), pp. 563–566.
4. Chuan Cheng, EckehardSpecht, Reaction rate coefficients in decomposition of lumpy limestone of different origin. ThermochemicaActa, Volume 449, Issues 1–2, 1 October 2006, Pages 8–15.
5. Rong, W.J., Li, B.K., Qi, F.S., Combustion Characteristics of Calcium Carbide Furnace Off-Gas in a New Type Combustor of Twin Burn Annular Shaft Kiln. DongbeiDaxueXuebao/Journal of Northeastern University, Volume 39, Issue 2, February 2018, Pages 200–204.
6. Чижилова В. М. Агломерация: Современный аспект / В. М. Чижилова, Н. А. Савчук, В. М. Чижилова. – Москва : Metallurgiya, 2004. – 124 с.
7. Senegačnik, A., Oman, J., Širok, B, Analysis of calcination parameters and the temperature profile in an annular shaft kiln. Part 2: Results of tests. Applied Thermal Engineering, Volume 27, Issue 7–8, June 2007, Pages 1473–1482.
8. Лисиенко В. Г. Теплофизика металлургических процессов / В. Г. Лисиенко, В. И. Лобанов, Б. И. Китаев. – Москва : Metallurgiya, 1982. – 240 с.
9. Буткарев А. П. Исследование способа получения частично-восстановленных окатышей при сжигании газа в плотном слое / А. П. Буткарев, Г. М. Майзель, В. И. Матюхин, В. И. Лобанов, Ю. Г. Ярошенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1981. – № 2. – С. 31–33.
10. Телегин А. С. Тепломассоперенос : учебник для вузов / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко ; под ред. Ю. Г. Ярошенко. – Москва : ИКЦ «Академкнига», 2002. – 435 с.
11. Матюхин В. И. Исследование условий формирования зоны горения газа в слое железорудных окатышей / В. И. Матюхин, В. И. Лобанов, Я. М. Гордон // Известия вузов. Черная металлургия. – 1982. – № 11. – С. 18–21.
12. Гордон Я. М. Особенности изменения основных характеристик процесса горения газа в плотном слое с коэффициентом расхода воздуха меньшим единицы. Сообщ. 1 / Я. М. Гордон, В. И. Лобанов, В. И. Матюхин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1983. – № 2. – С. 101–105.
13. Rong, W. J., Li, B. K., Qi, F. S., Cheung, S. C. P. Energy and exergy analysis of an annular shaft kiln with opposite burners. Applied Thermal Engineering, Volume 119, 2017, Pages 629–638.
14. Лобанов В. И. Исследование условий формирования зоны горения в слое железорудных окатышей для улучшения их металлургических свойств / В. И. Лобанов, В. И. Матюхин, В. А. Гольцев, Ю. Г. Ярошенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1987, № 6. – С. 103–104.
15. Брюханов О. Н. Аэродинамика, горение и теплообмен / О. Н. Брюханов, Б. С. Мастрюков. – Санкт-Петербург : Недра, 1994. – 317 с.

16. Andrej Senegačnik, Janez Oman, BraneŠirok, Annular shaft kiln for lime burning with kiln gas recirculation. Applied Thermal Engineering, Volume 28, Issue 7, May 2008, Pages 785–792.

17. T. Schwertmann Thermodynamic aspects of the counterflow lime burning process – Part 1. ZGK International, 57 (8) (2004), pp. 48–58.

## **РАСШИФРОВКА ДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИНЦИПА ПЕРВОЙ ПРОИЗВОДНОЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ НУЛЕВОЙ ЛИНИИ ДИЛАТОГРАММЫ**

**Михайлов Сергей Борисович,**

E-Mail: [msb.immt@gmail.com](mailto:msb.immt@gmail.com),

**Шарапова Валентина Анатольевна,**

**Карелова Александра Евгеньевна**

Уральский федеральный университет,

Институт новых материалов и технологий,

г. Екатеринбург,

**Михайлова Наталья Арефьевна,**

УрГУПС,

г. Екатеринбург

**Аннотация.** В практике физического материаловедения широко используются дилатометрические измерения в виде регистрации размеров образцов при изменении температуры. Базовым моментом является выявление температур критических точек превращений «начало/конец» на основе анализа отклонений дилатограмм от касательных, проведенных в температурных интервалах вблизи перегибов/изломов, наблюдаемых на получаемых экспериментальных кривых.

Однако, в большинстве случаев, эта информация имеет рамочный характер из-за наличия недостатков в определении температур критических точек, обусловленных наличием кривизны дилатограмм и «вариативности» выбора критериев, характеризующих искомые температурные точки. В ряде случаев, для компенсации этих недостатков дополнительно используются результаты анализа изменений первой производной дилатометрических кривых. Суть варианта основана на представлении дилатограмм в виде суммы дилатометрических эффектов, базовым из которых является эффект тепловых изменений в чистом виде, определяемый асимметричностью силового взаимодействия атомов, составляющих основу химического состава материала образца.

Предполагается, что хромотографический подход с использованием моделей процессов («S» и колоколообразных кривых), в дальнейшем, позволит провести расшифровку полученного спектра с выделением однозначной информации о температурах критических точек фазовых, карбидного и (для сплавов на основе железа) ферромагнитных превращений.

**Ключевые слова.** Фазовые превращения, феррит, аустенит, карбиды, дилатометр нагрева и охлаждения, дилатограмма, температурный коэффициент теплового расширения, дилатометрические эффекты.

## Введение

В физическом металловедении дилатометрические измерения [1–5] широко используются для выявления закономерностей протекания структурных и фазовых превращений, проходящих в металлических материалах при нагреве и охлаждении.

Как правило, дифференцирование кривой дилатограммы сопровождается появлением в температурных интервалах двойного перегиба типа «S»-кривой максимума соответствующего знака. При этом предполагаем, что дилатометрический образец, одновременно фиксируя температуру и размерную реакцию образца, действует как датчик, при работе дилатометра в качестве прибора дифференциального термического анализа (ДТА) [1, 6].

В связи с этим тонкая структура кривой в дифференциальном варианте представляет собой последовательный набор, иногда перекрывающихся, максимумов/минимумов. Для сталей, при нагреве и последующем охлаждении, самым ярко выраженным минимумом при нагреве (максимумом при охлаждении) является эффект, температурно-соответствующий варианту «S»-кривых, инициируемых  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  превращением (рис. 1, «Базовая» кривая).

Остальные максимумы можно отнести к спутным. Их существование затрудняет однозначность определения температур критических точек превращений общепринятой методикой проведения пересекающихся касательных к двойным перегибам дилатограммы [2]. Наложение этих максимумов приводит к искажению их формы и частичной потере экспериментальных точек. Предложен способ для восстановления их формы недостающими точками и получения полной картины разложения исходной кривой на простейшие составляющие тонкой структуры [9].

## Результаты и обсуждение

Алгоритм в первую очередь предусматривает получение модели наиболее ярко выраженного эффекта в виде кривой «ПИК\_01» с полностью восстановленной формой. Далее проводится вычитание полученной кривой из «Базовой-01» кривой с получением «спутной» кривой «ОСТАТОК-01», используемой далее в качестве «Базовой-02», и расщепляемой в процессе последующего шага ранее описанной методики на кривые «ПИК-02» и «ОСТАТОК-02» и т. д.

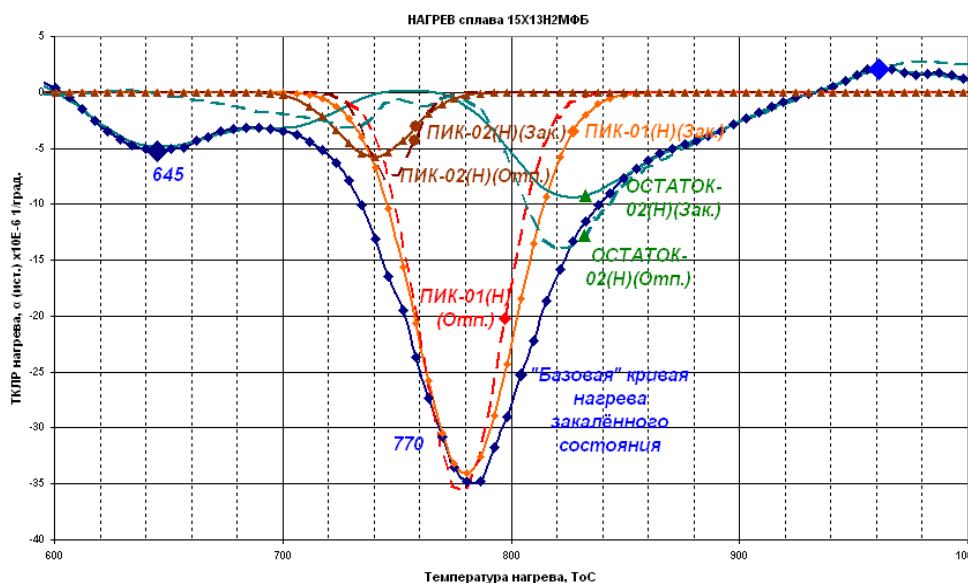


Рис. 1 Определение тонкой структуры «ПИК-01», «ПИК-02», «ОСТАТОК-02» для дилатометрического эффекта  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения сплава 15X13H2MФБ при нагреве закаленного (сплошные линии) и отпущенного (пунктирные линии) образца



При наличии однозначно проведенной фоновой линии «ФОН-ТКЛР» к базовой кривой «dDL-Эффект», учитывая вид получаемых максимумов, в качестве модели их математического описания «ПИК-01», предлагается использовать симметричные максимумы, выбираемые из множества генерируемых кривых нормального распределения [9, 10].

Варьируя значения двух координат вершины и дисперсию моделирующего максимума «ПИК-01» нормального распределения, обеспечиваем совмещение модели с экспериментальной «Базовой» кривой, аналогично варианту совмещения, реализованному в районе температуры 770 °С (рис. 1). При этом выделенная из множества кривых нормального распределения совмещаемая модель «ПИК-01» должна набором недостающих точек полностью обеспечивать ожидаемую симметричную форму кривой этого эффекта. Дальнейшее совершенствование модели должно предусматривать наличие ее асимметрии, по крайней мере, в связи с возможной задержкой рассасывания тепловых потоков.

Учитывая правило «3 $\sigma$ » нормального распределения, появляется возможность расчета критических температур «начала» и «конца» превращения в чистом виде без искажающего влияние «сателлитных» эффектов (табл. 1). Учет искажающего влияния этих эффектов при использовании традиционной методики касательных практически не реален. Считаем, что предлагаемый подход с учетом ТКЛР – принципов может в будущем успешно конкурировать с общепринятой методикой проведения пересекающихся касательных при описании превращений в материале образцов.

Особо необходимо отметить существование максимума «ПИК-02» связываемого нами с формированием аустенита с повышенным, относительно среднего, содержанием легирующих аустенитообразующих элементов. В настоящее время экспериментальное выявление этого процесса, помимо использования оценки количества ревертированного аустенита [10, 11], весьма затруднительно.

Комплекс «сателлитных» дилатометрических эффектов «ОСТАТОК-02» требует дополнительных экспериментальных и теоретических проработок для получения информации о карбидных превращениях [10–12] и процессах формирования ферромагнитной компоненты структуры [12] (рис. 2, а).

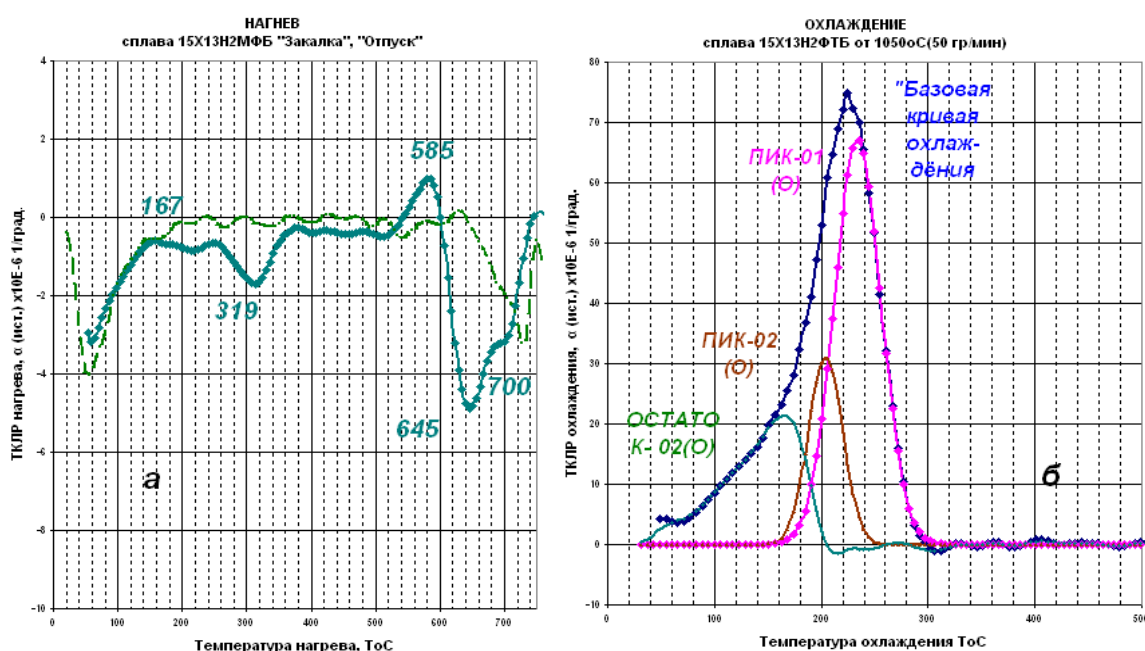


Рис. 2 Дилатометрические эффекты тонкой структуры сплава 15X13N2MФБ: а – нагрев ферритного состояния после закалки (сплошная линия) и после отпуска 650 °С/2 ч (пунктирная линия); б – для  $\gamma \rightarrow \alpha$  мартенситного превращения (базовая линия) и эффектов от тонкой структуры «ПИК-01(O)», «ПИК-02(O)» и «ОСТАТОК-02(O)»

Подобный подход к расшифровке дилатометрических измерений нагрева используется в работе [13]. Однако в этой работе отсутствует механизм детализации процессов выделения тонкой структуры эффекта  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения, что не позволяет однозначно фиксировать критические точки предлагаемой модели трехступенчатого процесса его протекания.

Проведено опробование возможностей разработанного алгоритма при варианте нагрева применительно к ситуации охлаждения сплава 15X13H2MФБ от 1050 °С (рис. 2, а). В интегральном виде дилатограмма «DL» охлаждения получена методикой прямых измерений. Имеющий место двойной перегиб в виде «S-01(O)» кривой однозначно идентифицируется как результат протекания  $\gamma \rightarrow \alpha$  мартенситного превращения. Температуры его критических точек «начало» и «конец», оцененные методикой проведения пересекающихся касательных, представлены в табл. 2 в сопоставлении с предлагаемой методикой использования ТКЛР-принципа.

Таблица 1  
Сопоставление значений критических температур  $\alpha \rightarrow \gamma$  превращения закаленного и отпущенного состояний, при использовании традиционной методики касательных и по расчетам кривой «ПИК-01(H)» (рис. 1)

Метод оценки	Критические точки при нагреве закаленного состояния (ТоС)								
	Начало ( $A_{C1}$ )				Максимум	Конец ( $A_{C3}$ )			
Касательные	0	1	2	3			4	5	6
		618	723	740	760		786	804	832
ПИК-01(H) (Зак.)	756 <sub>(2σ)</sub> 747 <sub>(3σ)</sub> 733 <sub>(4σ)</sub> 722 <sub>(5σ)</sub>				780/(-34) (2σ=22)	82 <sub>(2σ)</sub> 813 <sub>(3σ)</sub> 824 <sub>(4σ)</sub> 835 <sub>(5σ)</sub>			
Критические точки при нагреве отпущенного состояния (ТоС)									
Касательные		690	740	764		790	803	832	
ПИК-01(H) (Отп.)		744 <sub>(4σ)</sub> 735 <sub>(5σ)</sub> 694 <sub>(0)</sub>	762 <sub>(2σ)</sub> 753 <sub>(3σ)</sub>		780 (-37) (2σ=18)	798 <sub>(2σ)</sub> 807 <sub>(3σ)</sub> 816 <sub>(4σ)</sub> 825 <sub>(5σ)</sub> 870 <sub>(0)</sub>			

Таблица 2  
Температуры критических точек мартенситного превращения при охлаждении от 1050 °С/05 ч/50 °С/мин., полученные традиционной и предлагаемой методиками

Метод оценки	Критические точки охлаждения от 1050 °С, (Т°С)								
	Конец ( $M_K$ )				Максимум	Начало ( $M_H$ )			
Касательные	1	2	3	0			4	5	6
		77	168	185			235	250	278
ПИК-01	213 <sub>(2σ)</sub> 201 <sub>(3σ)</sub> 190 <sub>(4σ)</sub> 179 <sub>(5σ)</sub> 145 <sub>(0)</sub>				235/(+65) (2σ=22)	257 <sub>(2σ)</sub> 268 <sub>(3σ)</sub> 279 <sub>(4σ)</sub> 290 <sub>(5σ)</sub> 316 <sub>(0)</sub>			

Если нулевая (фоновая) линия «ФОН-DL» отражает в чистом виде только тепловое изменение размеров образца, то ее разность с экспериментальной дилатограммой «dDL-Эффект» должна определять протекание процессов, сопутствующих этому тепловому изменению.

При дифференцировании кривых «dDL-Эффект» максимумы появляются для каждой «S»-кривой виде спектра. Суммирование этих максимумов характеризуется «Базовой» кривой (рис. 2, б) аналогично варианту нагрева (рис. 1). Оказалось, что в данном случае, эту «Базовую» кривую охлаждения можно характеризовать тремя эффектами тонкой структуры «ПИК-01», «ПИК-02» и «ОСТАТОК-02» (рис. 2, б).

### **Заключение**

Таким образом, алгоритм расшифровки дилатограмм показал стабильность его реализации, как в случае охлаждения, так и нагрева. При этом получены результаты, дополняющие применение общепринятой методики проведения пересекающихся касательных. В первую очередь, это уточняющий вариант однозначности оценки температур критических точек превращений и особенностей проявления тонкой структуры регистрируемых дилатометрических эффектов. Планируется использование в будущем параметров кривой «ПИК-01» (координаты максимума и дисперсия) в качестве более полной однозначной характеристики «начала», «конца» и «максимума» анализируемого фазового превращения в сочетании с проявлением «спутанных» эффектов карбидообразования [11] и ферромагнетизма [12] для сплавов на основе железа.

### **Библиографический список**

1. Черепин В. Т. Экспериментальная техника в физическом металловедении / В. Т. Черепин. – Киев : Техника, 1968. – 280 с.
2. Романов П. В. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении стали: Атлас термокинетических диаграмм. Ч. 1 / П. В. Романов. – Новосибирск : Изд-во Сиб. Отд. АН СССР, 1960. – 51 с.
3. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике : справочник / ред. Б. Е. Неймарк [и др.]. – Москва ; – Ленинград : Энергия, 1967. – 240 с.
4. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел С. И. Новиков. – Москва : Наука, 1974. – 293 с.
5. Попова Л. Е. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана : справочник термиста / Л. Е. Попов, А. А. Попов. – Москва : Металлургия, 1991. – 503 с.
6. Лившиц Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Линецкий. – Москва : Металлургия, 1980. – 320 с.
7. Геллер Ю. А. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. – Москва : Металлургия, 1983. – 384 с.
8. Уэндландт У. Термические методы анализа / У. Уэндландт ; пер. с англ. под редакцией В. А. Степанова и В. А. Берштейна. – Москва : Мир, 1978. – 526 с.
9. Смирнов М. А. Основы термической обработки стали : учебное пособие / М. А. Смирнов, В. М. Счастливец, Л. Г. Журавлев. – Москва : Наука и технологии, 2002. – 519 с.
10. Гольдшейн М. И. Специальные стали : учебник для вузов / М. И. Гольдшейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – Москва : Металлургия, 1985. – 408 с.
11. Белоус М. В. Превращения при отпуске стали / М. В. Белоус, В. Т. Черепин, М. А. Васильев. – Москва : Металлургия, 1973. – 232 с.
12. Бозорт Р. Ферромагнетизм / Р. Бозорт. – Москва : Иностранная литература, 1956. – 784 с.
13. Панов Д. О. Дилатометрические исследования процессов аустенитизации в межкритическом интервале температур закаленной и высокоотпущенной низкоуглеродистой стали / Д. О. Панов // Современные проблемы науки и образования. № 6, 2014. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=16033> (дата обращения: 20.12.2015).

## ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ РАБОТЫ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ НА ИЗВЛЕЧЕНИЕ ВАНАДИЯ В ЧУГУН

Пантелеев Владислав Викторович,  
E-Mail: [vpanteleev@urfu.ru](mailto:vpanteleev@urfu.ru),  
Половец Михаил Вячеславович,  
E-Mail: [mvpolovets@urfu.ru](mailto:mvpolovets@urfu.ru),  
Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** Известно, что переход ванадия в чугун определяется развитием физико-химических процессов. Анализ данных работы доменных печей АО «ЕВРАЗ НТМК» показал, что отношение массы шлака к массе чугуна на выпуске влияет на извлечение ванадия в чугун.

**Ключевые слова.** Ванадий, чугун, шлак, доменная печь, извлечение ванадия.

Основной задачей выплавки чугуна из ванадийсодержащих титаномагнетитов является максимальное извлечение ванадия из железорудного сырья. Целью данного исследования является оценка влияния основных факторов работы доменных печей АО «ЕВРАЗ НТМК» на извлечение ванадия в чугун. Подробный анализ поведения ванадия в доменной печи, приведенный в работе [1], позволил выявить основные условия развития физико-химических процессов, обеспечивающих максимальное извлечение ванадия. Основная проблема переработки титаномагнетитового сырья связана с образованием карбидов титана.

Извлечение ванадия можно оценивать с помощью коэффициента распределения между чугуном и шлаком ( $L_V$ ) и на основе степени перехода ванадия в чугун ( $\eta_V$ ), которые определяются следующими уравнениями [2]:

$$L_V = \frac{[V]}{(V_2O_5)}, \quad (1)$$

где  $[V]$  – содержание ванадия в чугуне, %;  $(V_2O_5)$  – содержание пентоксида ванадия в шлаке, %.

$$\eta_V = \frac{M_{\text{чуг}}[V]}{M_{\text{чуг}}[V] + M_{\text{шл}} \cdot \omega_V \cdot (V_2O_5)}, \quad (2)$$

где  $M_{\text{чуг}}$ ,  $M_{\text{шл}}$  – масса чугуна и шлака на выпуске (соответственно) т,  $\omega_V$  – массовая доля ванадия в соединении.

Для оценки влияния факторов на извлечение ванадия в чугун использовался метод группировки [3]. Данные выстраивались в вариационный ряд по одному из признаков и находились средние значения в выбранных интервалах. Условием группировки служило статистически значимое различие между средними значениями параметров в каждой группировке. Различие средних значений всех анализируемых параметров оценивались по критерию Стьюдента.

Статистический анализ показал, что с одной стороны, увеличение основности шлака будет сопровождаться увеличением десульфурации чугуна (рис. 4). С другой стороны, при увеличении основности увеличится температура ликвидус шлака, при этом потребуется увеличение теплового состояния горна печи для поддержания хорошей текучести шлака.

Содержание титана, кремния и серы в чугуне являются основными показателями, характеризующими тепловое состояние горна печи. Содержание титана в металле умеренно растет с температурой, достигая значений, значительно превышающих предел растворимости, что говорит о переходе титана в карбидную форму (рис. 2). Увеличение количества карбидов способствует затормаживанию движения шлака.

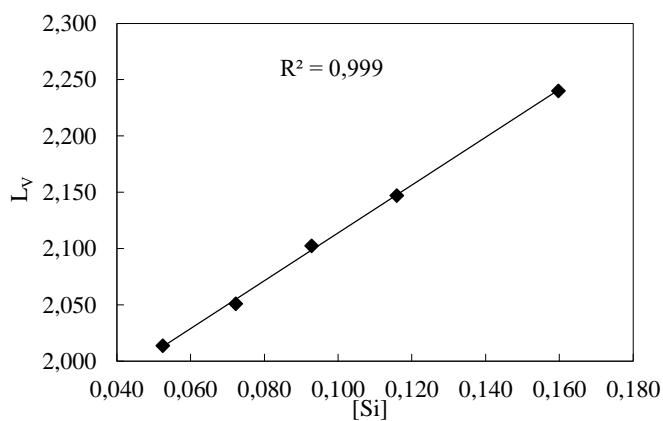


Рис. 1 Зависимость коэффициента распределения ванадия от содержания кремния в чугунае

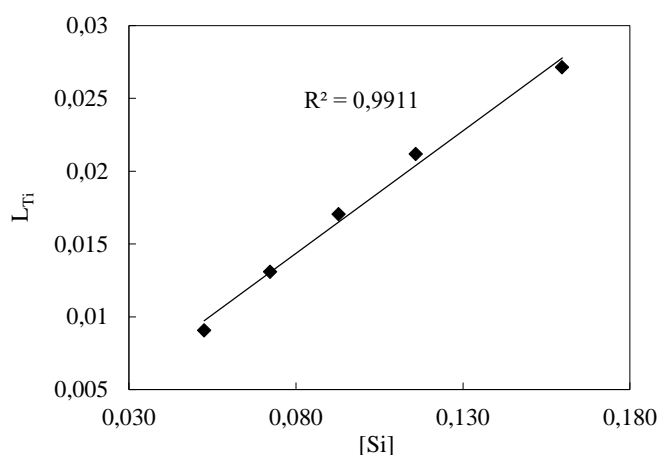


Рис. 2 Зависимость коэффициента распределения титана от содержания кремния в чугунае

В то же время, повышение основности влияет на распределение титана и ванадия между чугуном и шлаком (рис. 3).

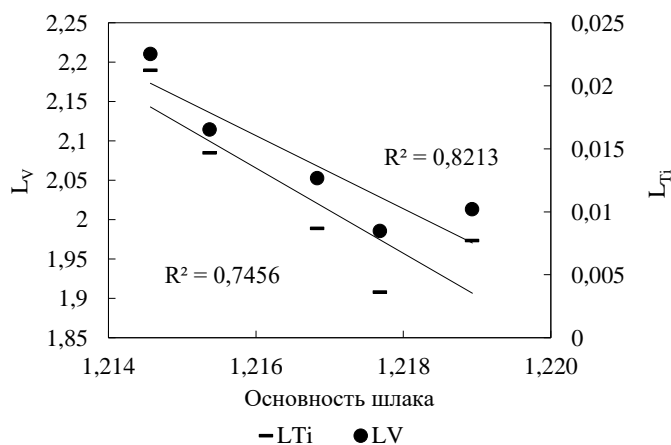
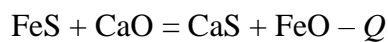


Рис. 3 Зависимость коэффициента распределения титана и ванадия от основности шлака

Известно, что основной реакцией десульфурации является:



Таким образом, повышение основности должно идти с понижением содержания серы в чугунае.

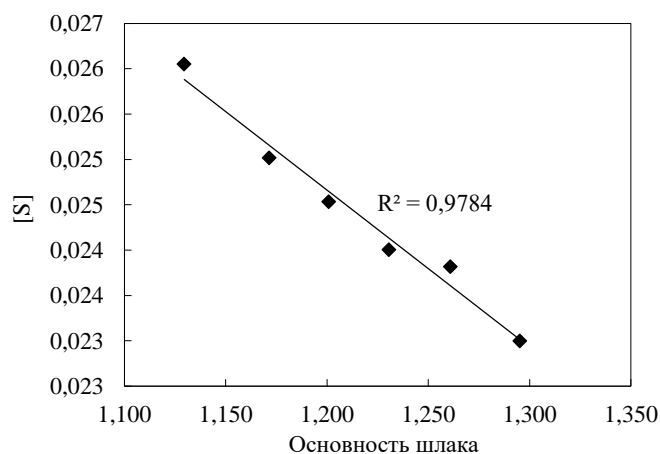


Рис. 4 Зависимость содержания серы в чугуна от основности шлака

Взаимосвязь между содержанием кремния и серы в чугуна обусловлена тем, что реакции десульфурации протекают с поглощением тепла. Чем выше нагрев печи, тем в большей степени сера переходит из чугуна в шлак.

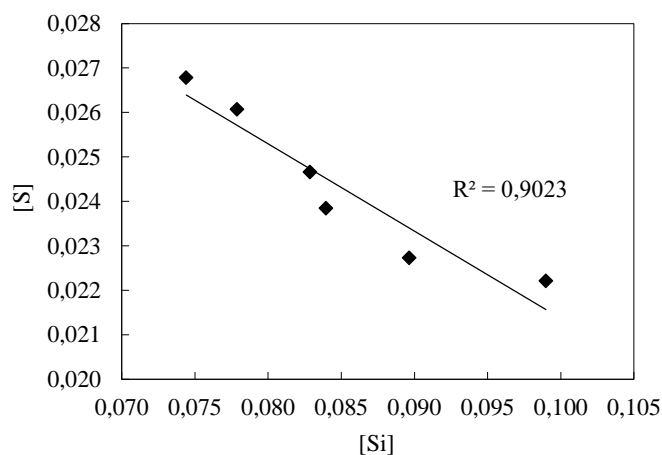


Рис. 5 Зависимость содержание серы от содержания кремния в чугуна

Во время чрезмерно горячего хода печи, содержание кремния в чугуна повышается до очень высоких значений. Поскольку кремний переходит в чугун из  $\text{SiO}_2$ , то основность шлака при этом увеличивается. Это приводит к повышению его температуры ликвидус [4].

Вышеуказанные факторы, влияющие на извлечение ванадия в чугун, при существующей технологии выплавки чугуна не могут быть изменены в силу того, что на эти факторы накладывается ограничение.

В качестве одного из факторов, определяющих извлечение ванадия, рассматривается стабильность работы доменной печи. В частности, стабильность режима отработки продуктов плавки.

Своевременный выпуск чугуна и шлака из доменной печи – является важнейшим условием успешной плавки титаномагнетитов. Анализ данных работы доменных печей АО «ЕВРАЗ НТМК» показал, что отношение массы шлака к массе чугуна изменяется в широком диапазоне. Среднее значение которого равно 0,35, а стандартное отклонение достигает значения 0,28.

Нестабильность выпуска продуктов плавки может привести к изменению развития физико-химических процессов, определяющих переход ванадия в чугун.

Анализ работы печей показал, что извлечение ванадия в чугун составляет 82–87 % (рис. 7); выход шлака в среднем равен 350 кг/т чугуна.

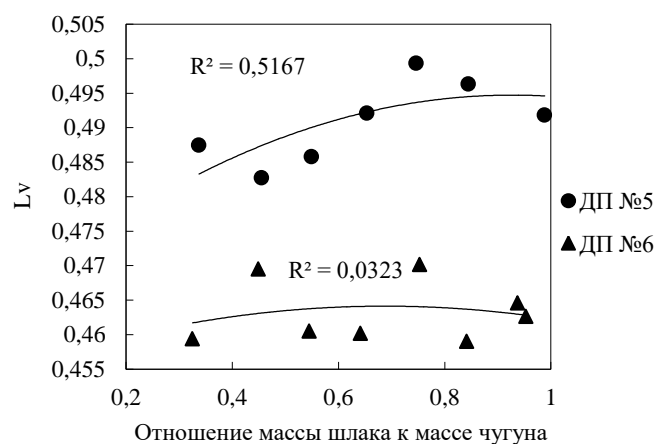


Рис. 6 Зависимость коэффициента распределения ванадия между чугуном и шлаком от отношения массы шлака к массе чугуна

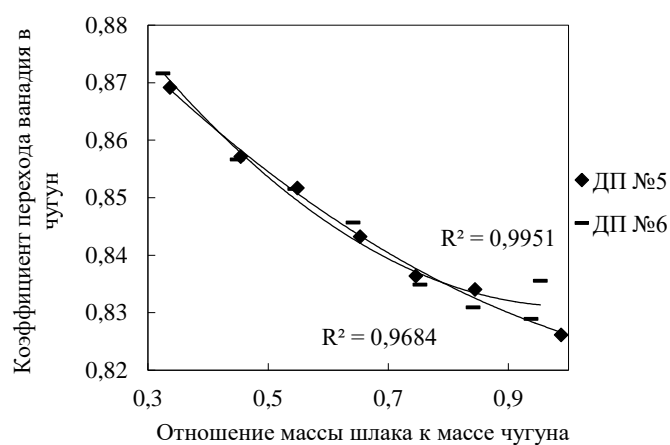


Рис. 7 Зависимость коэффициента перехода ванадия в чугун от отношения массы шлака к массе чугуна

Изменение отношения массы шлака к массе чугуна на выпуске существенно влияет на извлечение ванадия в чугун (рис. 6, 7).

Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что повышение колебаний отношения массы шлака к массе чугуна на выпуске приводит к уменьшению извлечения ванадия в чугун.

#### Библиографический список

1. Смирнов Л. А. Металлургическая переработка ванадийсодержащих титаномагнетитов / Л. А. Смирнов, Ю. А. Дерябин, С. В. Шаврин. – Челябинск : Metallurgy, 1990. – 256 с.
2. Миронов К. В. Анализ поведения ванадия в условиях высокой интенсивности доменной / К. В. Миронов, В. А. Михалев, К. Б. Пыхтева, Б. С. Тлеугабулов // Черные металлы. – 2018. – № 1 – С. 23–29.
3. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Наука, 1971. – 568 с. <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=458351>.
4. Geerdes M., Chaigneau R., Kurunov I., Lingiard O., Ricketts J. Modern blast furnace ironmaking. 3rd ed. IOS Press, 2015. – 228 p.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК СТАЛЬ-МЕДЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Пасечник Сергей Юрьевич,

E-Mail: [svarka-ekl@mail.ru](mailto:svarka-ekl@mail.ru),

Пасечник Андрей Юрьевич,

E-Mail: [aprel-tlsa@yandex.ru](mailto:aprel-tlsa@yandex.ru),

Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ),

Донецкая Народная Республика, г. Донецк

**Аннотация.** В работе приведены технологические особенности получения биметаллических заготовок сталь-медь для подовых электродов дуговых печей постоянного тока большой мощности. Показано, что используемые в настоящее время альтернативные технологии не дают нужного качества заготовок или имеют большой процент брака. Электрошлаковая наплавка меди на сталь без использования предложенных технологических особенностей сопряжена с главной трудностью – растворением в стали меди, что приводит к увеличению переходной зоны и снижению электрической и тепловой проводимости такого слоя, что недопустимо для материала подовых электродов дуговых печей постоянного тока. Предложенная технология решает эту задачу путем контролируемого ввода тепла в зону сварки как на стадиях нагрева и плавления, так и во время кристаллизации слоев с различными теплофизическими характеристиками, при этом минимизируется зона перемешивания и создаются условия для получения слоя меди неограниченной высоты.

**Ключевые слова.** Электрошлаковый переплав, электрошлаковая наплавка, биметалл, сталь-медь, флюс, нерасходуемый электрод, зона сплавления, макроструктура, микроструктура.

Применение деталей из биметалла сталь-медь актуально для многих агрегатов различных отраслей промышленности – это и проводниковый биметалл (ножи для рубильников; шины для распределительных устройств различные токопроводящие части электрических аппаратов) и конструкционный биметалл различной толщины (для химической аппаратуры). Особенно актуально использование биметалла медь-сталь в электроплавильных агрегатах большой единичной мощности, в которых осуществляется переход металлов в жидкое состояние с последующей кристаллизацией. К таким агрегатам относятся: рудотермические печи мощностью до 80 МВт, дуговые сталеплавильные печи постоянного тока емкостью до 200 т жидкой стали и т. п. [1].

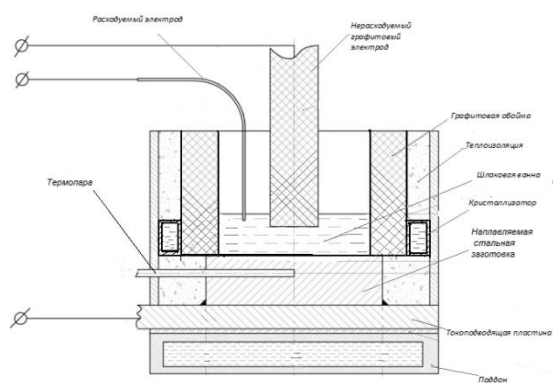
Способы получения биметаллов можно разделить на три группы: 1) без расплавления, использующие механическую энергию для деформации (совместное прессование, волочение, прокатка, сварка взрывом); 2) способы, при которых происходит расплавление хотя бы одного материала (комбинированное литье, наплавка, напыление); 3) электрохимическое нанесение одного материала на другой. Особую трудность представляет собой получение крупных (до нескольких тонн) биметаллических слитков, с минимальной зоной перемешивания. Большей частью подобные изделия получают способами, относящимися ко второй группе. Требования к таким изделиям: минимальная зона перемешивания меди и стали и отсутствие дефектов в зоне сплавления.

В настоящее время такие биметаллические электроды изготавливают несколькими способами: 1 – путем последовательного электрошлакового переплава стальной и медной заготовки в кристаллизатор [2], 2 – применением автовакуумной пайки [3], 3 – использование метода алюмотермической сварки [4], 4 – применение сварки взрывом [1]. Все эти способы имеют ряд существенных недостатков. Так, в способе 1 образуется протяженная зона перемешивания стали с медью (более 300 мм для электродов диаметром

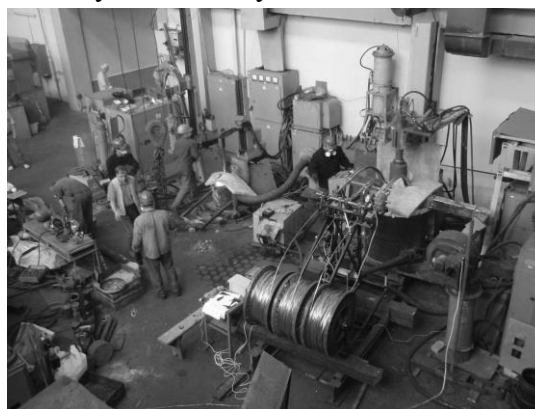


300 мм и длиной 2 м), что приводит к существенному снижению теплопроводности; 2-й способ требует точной подгонки соединяемых заготовок (зазор не должен быть более 0,5 мм) и применения сложной вакуумной техники; 3-й способ характеризуется значительной долей брака при получении таких заготовок (более 50 %), связанным с невозможностью управления процессом сварки; 4-й способ не позволяет наносить слой меди более 10–20 мм (для подовых электродов крупных дуговых печей, например, 300-тонных он должен быть диаметром 700 мм и высотой 1 м и более).

В ДонНТУ разработан способ электрошлаковой наплавки меди на сталь для получения крупных (диаметрами до 700 мм) биметаллических слитков общим весом до 1 т [5] (рис. 1, а). Отличительные особенности способа: наплавка меди на сталь осуществляется послойно в два этапа, с контролем температуры околошовной зоны наплавляемой заготовки; процесс наплавки ведется дискретно с плавным изменением теплофизических свойств шлаковой ванны непосредственно в ходе плавки, за счет изменения химического состава используемого флюса. Первый (промежуточный) слой наплавляют электрошлаковым способом с применением флюса системы  $\text{CaF}_2\text{-Na}_3\text{AlF}_6$  с содержанием основных компонентов (по массе) 80 %  $\text{CaF}_2$  и 20 %  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ . Подогрев стальной заготовки осуществляют графитовым не расходующимся электродом до температуры, обеспечивающей смачивание стали медью. По достижении заданной температуры стальной заготовки в сварочную ванну вводят медную катанку марки М00 (рис. 1, б). После наплавки первого слоя снижают вводимую в шлаковую ванну тепловую мощность, и прекращают подачу наплавочного материала, создавая условия для кристаллизации наплавленного (промежуточного) слоя. Далее приступают к операции плавной смены химического состава расплавленного шлака (без его скачивания), с целью снижения температуры шлаковой ванны и обеспечения необходимых условий для бездефектной наплавки второго слоя меди. Таким образом, наплавку основного (рабочего) слоя меди, производят на закристаллизовавшийся промежуточный слой с использованием флюса нового состава. После наплавки определенного количества металла второго слоя, его дальнейшее наращивание можно проводить на любую величину.



а



б

Рис. 1 Процесс электрошлаковой наплавки меди на сталь:  
а – схема процесса; б – опытная установка для получения биметаллического электрода сталь-медь диаметром 700 мм с высотой наплавленного медного слоя 500 мм на стальную основу, высотой 600 мм

Исследования макро- (рис. 2) и микроструктуры (рис. 3), а также проведенные механические, электрические и теплофизические испытания образцов, вырезанные из различных зон наплавленного слитка показали, что граница раздела металлов представляет собой четкую линию без следов размытия, макродефекты в зоне соединения отсутствуют; в меди выявлена структура литого металла с кристаллитами, ориентированными в направлении отвода тепла при кристаллизации. В то же время, со

стороны меди наблюдается структурная неоднородность вблизи границы соединения материалов, ширина зоны неоднородности составляет 1,2...3,0 мм (рис. 3). Испытания на разрыв показали, что разрушение происходит по наплавленному металлу, что свидетельствует о надежности зоны сплавления.

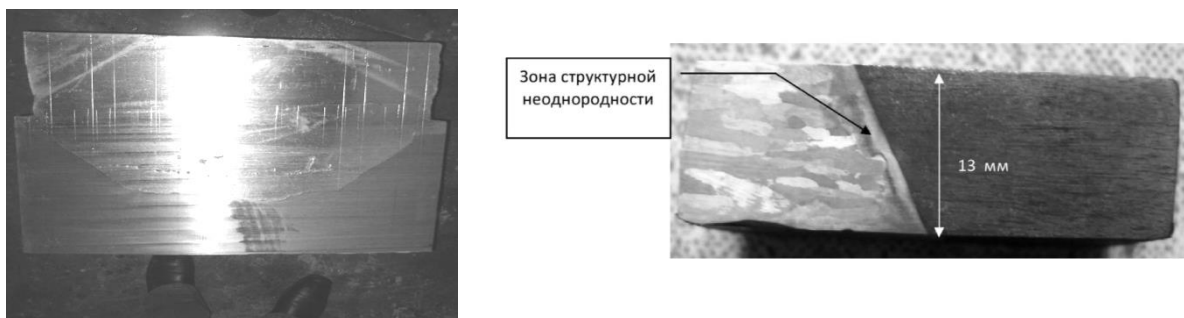


Рис. 2 Макроструктура наплавленного образца

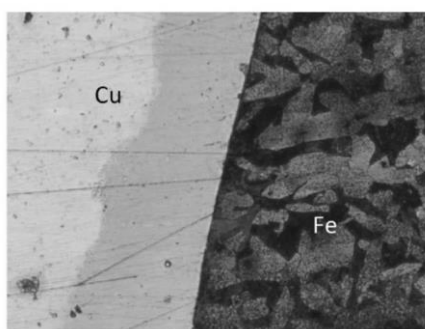


Рис. 3 Микроструктура зоны соединения,  $\times 100 \times 1/2$

Предложенная технология позволяет значительно упростить процесс получения биметаллических «сталь-медь» заготовок, повысить их качество и исключить брак для подовых электродов дуговых печей постоянного тока большой мощности, при этом можно использовать стандартное оборудование для электрошлаковых технологий.

#### Библиографический список

1. Оголихин В. М. О создании композиционных материалов с заданной теплопроводностью сваркой взрывом / В. М. Оголихин, С. Д. Шемелин // Технология машиностроения. – 2008. – № 4. – С. 5–8.
2. Применение ЭШП по двухконтурной схеме для получения сталемедных заготовок анодов дуговых печей постоянного тока / В. А. Зайцев, Л. Б. Медовар, П. И. Тищенко, Б. Б. Федоровский, В. М. Журавель // Современная электрометаллургия. – 2011. – № 2.
3. Григоренко Г. М. Биметаллические материалы и изделия, изготавливаемые высокотемпературной некапиллярной пайкой / Г. М. Григоренко, Л. Г. Пузрин, М. А. Полещук, А. Л. Пузрин // Современная электрометаллургия. – 2011. – № 4. – С. 15–19.
4. Лопухов Г. А. Подовый электрод дуговой сталеплавильной печи постоянного тока конструкции фирмы DANIELI / Г. А. Лопухов // Электрометаллургия. – 2004. – № 6. С. 48.
5. Пат. 104262 Украина. МПК (2013.01) B23K 9/00 В 23K 9/23 (2006.01) B23/C 703/22 (2006.01). Способ электрошлаковой наплавки меди и ее сплавов на сталь / С. Ю. Пасечник, А. Ю. Пасечник, Г. Г. Корицкий; заявитель и патентодержатель Донецкий нац. техн. ун-т. – № а 201303105; заявл. 14.03.2013; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19. – 6 с.: ил.

## РАЗРАБОТКА НОВЫХ КАЛИБРОВОК ШАРОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ С НЕПРЕРЫВНО-ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ

**Рубцов Виталий Юрьевич,**

E-Mail: [UriyIot@mail.ru](mailto:UriyIot@mail.ru),

Уральский федеральный университет,  
Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ,  
АО «ЕВРАЗ НТМК»,  
г. Нижний Тагил,

**Шевченко Олег Игоревич,**

E-Mail: [shevchenko\\_oleg@mail.ru](mailto:shevchenko_oleg@mail.ru),

Уральский федеральный университет,  
Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

**Аннотация.** В настоящий момент возможности металлорежущего оборудования позволяют получать поверхности практически любой сложности, это дает возможность совершенствовать известные технологии и оборудование, выводя их на новый качественный уровень. В статье изложены современные подходы к созданию калибровок валков станов поперечно винтовой прокатки для производства мелющих шаров. Ключевым отличием является использование конструкции с непрерывно изменяющимися параметрами элементов профиля шаропрокатного вала. К таким элементам относятся: ширина реборды, изменяющаяся по длине вала; ее высота, с нелинейной функцией подъема реборды; шаг винтовой канавки с условием сохранения постоянства объема деформируемого металла. Особое внимание уделено новой концептуальной калибровке шаропрокатных валков с переменной глубиной впадины, перспективность применения которой обусловлено равномерностью обжатий и получения шаров не только с правильной геометрией, но и с более однородной структурой.

В статье выведены функции непрерывно изменяющегося шага винтовой канавки для валков с постоянной и переменной шириной реборды, а также с переменной глубины впадины. Проведено практическое испытание на валках для производства шаров с условным диаметром: 120 мм с непрерывно меняющимся шагом. Опыт показал положительные результаты как в снижении нагрузок, так и в повышении точности размеров получаемых шаров.

**Ключевые слова.** Шаропрокатный валок, переменный параметр, шаг винтовой линии, ширина реборды, глубина впадины, кривая 2-го порядка.

### **Введение**

Одним из хорошо известных и производительных способов производства мелющих шаров является поперечно-винтовая прокатка [1–2]. Деформация металла осуществляется на шаропрокатном стане в валках с винтовыми калибрами. Заготовка подается между валками, которые вращаются в одном направлении и расположены под определенными углами друг относительно друга. После прохода через калибры заготовка постепенно обжимается и приобретает форму шаров, которые в последний момент отделяются друг от друга за счет подрезки перемычки ребордой вала [1]. Калибровка шаропрокатных валков, включая конструкцию элементов профиля, должна позволять реализовывать производительную технологию и, с другой стороны, возможность изготовления прокатного инструмента на существующем металлорежущем оборудовании.

Изначально с 50-х гг. XX в., нарезка винтовых калибров валков шаропрокатных станов вызывала определенные затруднения т. к. производилась на токарно-винторезных станках.

Для реализации калибровок этого периода после предварительного расчета шага винтового калибра, производилась его корректировка с учетом возможности изготовления в условиях доступного станочного парка. Параметры винта обеспечивались, как правило,

подбором пар сменных шестерен и могли изменяться только дискретно. То есть готовый валок имел дискретно-изменяющийся шаг винтовой линии [1–4]. Преимуществом калибровок такого типа является относительная простота и доступность металлорежущего оборудования для производства валков. Недостатками является неравномерность обжатий при переходе с одного шага на другой, вызывающие скачки нагрузки на прокатный двигатель, а также длительность изготовления валков такого типа в связи с постоянной переборкой гитары станка и необходимостью его точной настройки на требуемый шаг.

Впервые непрерывно-изменяющийся нелинейный параметр в виде шага был использован на практике и описан в работах [5–6]. Данный способ нарезки обеспечивался за счет использования копировальных полуавтоматов. В настоящий момент изготовление шаропрокатных валков производится на четырех или пяти координатных обрабатывающих центрах с независимыми приводами, при помощи которых, используя 3-D модель, возможно получить открытый профиль любой сложности, образованный кривыми 1 и 2-го порядков [7].

Сочетание рациональной калибровки и совершенствование динамического режима прокатки, как было показано нами в работе [8], однозначно приводят к повышению срока службы прокатного инструмента.

В связи с вышесказанным, разработка конструкции валков с непрерывно изменяющимися параметрами элементов профиля, обеспечивающих меньший износ рабочих поверхностей, уменьшение динамических скачков нагрузки, а также равномерность обжатия приведет к более однородной структуре зерна и равномерному распределению температур на поверхности шаров, подвергаемых в дальнейшем термической обработке, является актуальной задачей.

#### **Переменные параметры, используемые в калибровках шаропрокатных валков**

Среди всех переменных параметров элементов профиля шаропрокатных валков можно выделить основные: шаг винтовой линии  $T_i$ , высота реборд  $H_i$ , ширина реборд  $B_i$  (рис. 1).

Влияние степени изменения шага на процесс прокатки и качество получаемых изделий анализировалось в следующих источниках [9–14]. В работе авторов из Люблинского технологического университета [15] представлены результаты экспериментальных исследований при применении валков с различной шириной реборд. Изучены три возможных конструктивных случая, когда по направлению движения заготовки вдоль валков ширина реборды: 1 – уменьшается, 2 – увеличивается, 3 – остается примерно постоянной. В первом случае отмечается уменьшение износа валков в зоне захвата заготовки, во втором – в точке их скрещивания, однако в обоих случаях наблюдается существенная разница обжатий по поверхности на шаре, что приводит к интенсивности износа валков. Третий вариант с приблизительно одинаковой шириной реборды по всей длине валка признан наиболее приемлемым. Судя по данным работ [1, 4, 6] ширина реборды зависит от параметров шага винтовой канавки  $T_i$  и развалки калибров  $S_i$  (рис. 1). В итоге рациональной конструкцией можно считать такую, в которой сначала реборда незначительно утоньшается, а затем по мере продвижения заготовки вдоль валков увеличивается, создавая благоприятные условия для отделения перемычки от готового шара.

Подъем реборд характеризуется увеличением их высоты на начальном, формирующем, участке валка. Это необходимо для обеспечения постепенного врезания в заготовку. Функция, определяющая прирост высоты – так называемый закон подъема реборды может быть линейным, параболическим или гиперболическим [7]. В настоящий момент наибольшее применение получил линейный закон. В случае применения нелинейного закона ширина реборды будет неравномерно «плавать» (рис. 1), что приведет к неравномерности прилегания металла к валку и нестабильности процесса прокатки.

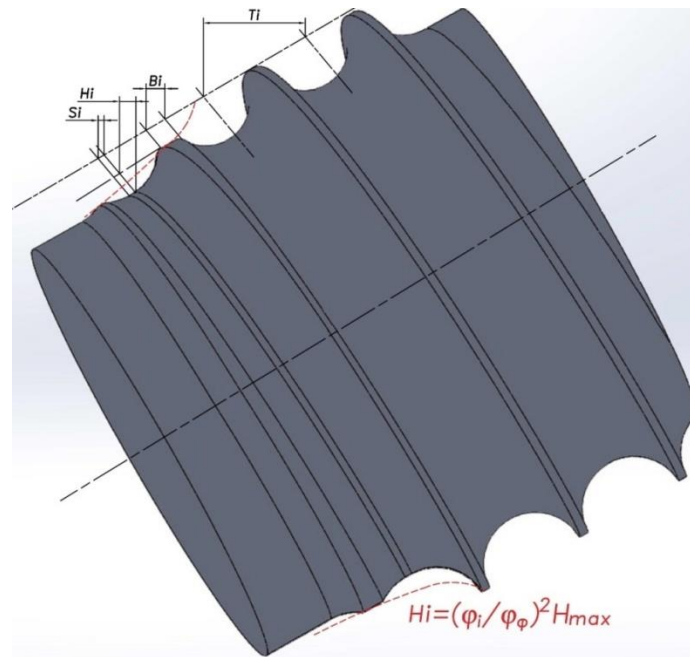


Рис. 1 Модель шаропрокатного вала с параболическим законом подъема реборды:  
 $T_i$  – шаг винтовой линии;  $B_i$  – ширина реборды;  $H_i$  – высота реборды;  $H_{max}$  – максимальная высота реборды (в конце формирующего участка);  $S_i$  – величина развалки калибра;  $\varphi_i$  – угол положения по длине винтовой линии от начала захода реборды,  $\varphi_\phi$  – угол, при котором заканчивается формирующий участок (при котором реборда имеет максимальную высоту  $H_{max}$ )

### Новые калибровки с непрерывно-меняющимися параметрами

Как отмечено выше, шаг винтовой линии, должен непрерывно изменяться, для сохранения постоянства объема металла между валками, ограниченного соседними ребордами, включая объем металла в перемычке. В ранее опубликованных нами работах [7, 16] выведена функция изменения шага  $\Delta t_\alpha$ , для валков с непрерывно-меняющимся шагом и постоянной шириной реборды.

$$\Delta t_\alpha = T_{осн} - \int_R^0 \frac{\pi b_\alpha (R^2 - x^2) + x^2 (R - \frac{x}{3})}{\pi R^2} dx, \quad (1)$$

где  $b_\alpha(b)$  – ширина реборды (длина перемычки);

$R$  – радиус сферы условного калибра (глубина впадины вала);

$T_{осн}$  – основной шаг калибровки (задается во время проектирования с учетом ширины реборды).

Для шаропрокатных валков с линейно-увеличивающейся шириной реборды функция изменения шага винтового калибра имеет вид (2):

$$\Delta t_\alpha = T_{осн} - \int_R^0 \frac{\pi b_{ам} (1 - x) + x^2 (R - \frac{x}{3})}{\pi R^2} dx. \quad (2)$$

Использование калибровок с непрерывно изменяющимся шагом, рассчитанных по формулам 1 и 2 позволяет исключить скачки нагрузок в процессе прокатки.

Для улучшения равномерности обжатий и распределения температур, а также формирования более однородной структуры шаров, разработана калибровка валков с переменной глубиной впадины.

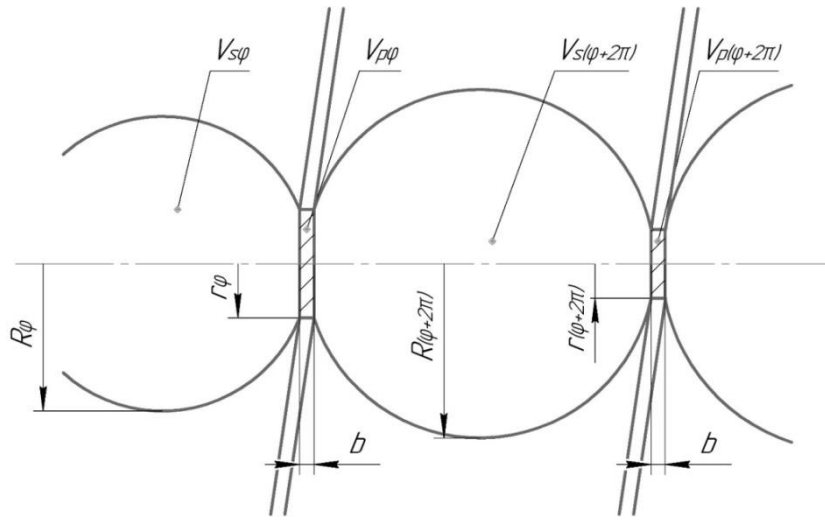


Рис. 2 Сечение заготовки во время прокатки с переменной глубиной впадины

С учетом условия прочности была задана ширина реборды, которая принята постоянной. Согласно рис. 2, применяя разбиение на простейшие геометрические фигуры, найдем изменение радиуса  $\Delta R$  образующей шара.

Из условий постоянства объема металла, проходящего через винтовой калибр, составим уравнение (3):

$$V_{p\varphi} + V_{s\varphi} - V_{p(\varphi+2\pi)} - V_{s(\varphi+2\pi)} = 0, \quad (3)$$

где  $V_{p\varphi}$  – объем усеченной перемычки условного калибра,  $V_{s\varphi}$  – объем усеченного шара условного калибра,  $V_{p(\varphi+2\pi)}$  – объем усеченной перемычки в следующем витке условного калибра,  $V_{s(\varphi+2\pi)}$  – объем усеченного шара в следующем витке условного калибра.

При подстановке значений объемов простых фигур, составляющих данную систему, получается

$$\pi r_{\varphi}^2 b + \left[ \frac{3}{4} \pi R_{\varphi}^3 - r_{\varphi}^2 \left( R_{\varphi} - \frac{r_{\varphi}}{3} \right) \right] - \pi r_{(\varphi+2\pi)}^2 b - \left[ \frac{3}{4} \pi R_{(\varphi+2\pi)}^3 - r_{(\varphi+2\pi)}^2 \left( R_{(\varphi+2\pi)} - \frac{r_{(\varphi+2\pi)}}{3} \right) - r_{\varphi}^2 \left( R_{\varphi} - \frac{r_{\varphi}}{3} \right) \right] = 0, \quad (4)$$

где  $r_{\varphi}$  – радиус перемычки условного калибра.

Для вывода функции изменения глубины впадины, принимаем  $r_{(\varphi+2\pi)} = 0$ , т. к. условно реборда сводится до соприкосновения. Подставив это значение в уравнение 2, получим

$$\pi r_{\varphi}^2 b + \frac{3}{4} \pi R_{\varphi}^3 - \frac{3}{4} \pi R_{(\varphi+2\pi)}^3 = 0. \quad (5)$$

Изменение глубины впадины по ходу винтовой линии будет определяться разницей впадин соседних витков:  $\Delta R = R_{(\varphi+2\pi)} - R_{\varphi}$ , подставив данное значение в уравнение 5 и преобразовав, получаем

$$\Delta R = \sqrt[3]{\frac{4}{3} r_{\varphi}^2 b + R_{\varphi}^3} - R_{\varphi}. \quad (6)$$

Так как при увеличении глубины канавки, рост радиуса калибра идет во всех направлениях, изменение радиуса калибра будет равно изменению шага винтовой линии  $\Delta R = \Delta T$ .

Задавшись переменным значением:  $0 < r_{\varphi} < R$ , где,  $r_{\varphi}$  – радиус предыдущего положения, а  $R = R_{\varphi}$  – радиус заготовки, функция изменения шага будет иметь вид

$$\Delta t = \int_0^R \left( \sqrt[3]{\frac{4}{3} x^2 b + R^3} - R \right) dx. \quad (7)$$

Таким образом, выражения (1), (2), (7) могут быть использованы для создания моделей валков необходимых для их изготовления.

### Промышленная апробация новых калибровок

В качестве производственного эксперимента была произведена калибровка шаропрокатных валков с непрерывно-меняющимся шагом, для получения шаров диаметром 120 мм.

Ширина реборды по всей длине валка принята постоянной и, исходя из условий прочности, составила 11 мм, в связи с этим расчет проводился по формуле (1).

Проинтегрировав выражение (1), определены 5 точек для построения кривой, образующей винтовую поверхность валка. Винтовая линия валка с непрерывно-меняющимся шагом является разновидностью пространственной кривой 2-го порядка, следовательно, она определяется пятью своими точками, причем никакие четыре из них не должны лежать на одной прямой [17]. По этим 5 точкам выстроена кривая, являющаяся винтовой линией с непрерывно-меняющимся шагом, на основе этой кривой построена 3-D модель валка. Затем, используя данную модель на 5-координатном обрабатывающем центре, был изготовлен комплект валков (рис. 3). Результаты пробной прокатки показали, что нагрузка при использовании валков с непрерывно-меняющимся шагом при прокатке снизилась на 25–35 %, в отличие от валков с дискретно-меняющимся шагом.



Рис. 3 Валок с постоянной шириной реборды и непрерывно-меняющимся шагом на апробации в стане

Размеры полученного шара на новых валках соответствуют требованиям ГОСТ 7524–2015 [18], причем обеспечивают значительно меньшую погрешность. Согласно ГОСТ, размеры должны находиться в диапазоне:  $125 \pm 5$  мм. Фактически составили  $125 \pm 0,4$  мм. Незначительный поясok шириной до 4 мм (рис. 4) не является браковочным признаком, а требуется для предотвращения переполнения калибра, в случае прокатки заготовки диаметром с допуском по верхнему предельному значению. На полученной партии шаров отсутствуют поверхностные дефекты, отмеченные стандартом как брак.



Рис. 4 Шар, полученный с опытной прокатки

## Выводы

1. Современные подходы калибровок шаропрокатных валков предполагают переход от дискретно-изменяющихся параметров к непрерывным. Рассмотрены геометрические параметры, для которых рационально использовать нелинейные зависимости.

2. Разработаны принципиальные конструкции и найдены функции изменения шага винтовой линии, для валков с непрерывно-меняющимся шагом при постоянной и переменной ширине реборды. Также впервые разработана конструкция шаропрокатного валка с переменной глубиной впадины. Применение данной калибровки валка создаст максимально равномерное обжатие с минимальными нагрузками на валок.

3. Проведено практическое испытание на валках для производства шаров с условным диаметром 120 мм с непрерывно меняющимся шагом. Опыт показал положительные результаты, как в снижении нагрузок, так и в повышении точности размеров получаемых шаров.

## Библиографический список

1. Tselikov, A. I. and Barbarich, M. V. Spetsial'nyeprokatnyestany (Special Rolling Mills), Moscow: Metallurgiya, 1971.
2. Smirnov, V. S., Anisiforov, V. P., Vasil'chikov, M. V. et al. Poperechnayaprokatka v mashinostroenii (Transverse Rolling in Manufacturing), Moscow: Mashgiz, 1957.
3. Shor, E. R. Novyeprotsessyprokatki (New rolling processes), Moscow: Metallurgizdat, 1960.
4. Peretyat'ko, V. N., Klimov, A. S., and Filippova, M. V. Roller grooving in ball-rolling mills. Part 1, Steel Transl., 2013, vol. 43, no. 4, pp. 168–170.
5. Granovskii, S. P. Novye protsessy i stany dlya prokatki izdelii v vintovykh kalibrakh (New Rolling Processes and Mills with Helical Grooves), Moscow: Metallurgiya, 1980.
6. Kotenok, V. I. Development of theory of profile forming in helical roll passes and creation of high effective processes and equipment for rolling of machines parts, Extended Abstract of Doctoral (Eng.) Dissertation, Moscow, 2005.
7. Rubtsov V. Yu., Shevchenko O. I. Production of ball-rolling rolls with a variable depth of chanel. Kalibrovochnoebyuro, 2019, no. 14, pp. 16–24. (in Russ).
8. Rubtsov V. Yu., Shevchenko O. I., Mironova M. V. Improvement of Rolling Dynamics to Increase Roller Life in Ball Rolling, Steel Transl., 2018., vol. 48., no.12., pp. 757–761.
9. Filippova, M. V., Temlyantsev, M. V., Peretyat'Ko, V. N., Prudkii, E. E. Rolling of metal balls. Steel Transl. 2017, 47, 435–439.
10. Quanxian, W., Qiping, W., Jianming, X. Study on the method for groove design in the helical rolling of steel balls. J. Mater. Process. Technol. 1995, 55, 340–344.
11. Yang, S. C., Chen, C. K. The surface geometry of rollers with skew rolling of steel balls. Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci. 2001, 215, 523–532.
12. Shi, X., Wang, B., Li, Z. Optimization of pass parameters on two-grooves skew rolling for Al ball. Key Eng. Mater. 2010, 419, 313–316.
13. Cao, Q., Hua, L., Qian, D.S. Numerical simulation on hot helical rolling forming process of blank for bearing steel balls. Bearing 2015, 1, 16–21.
14. J. Tomczak, Z. Pater, T. Bulzak, Designing of screw impressions in the helical rolling of balls, Archives of Civil and Mechanical Engineering 14 (2014) 1, 104–113.
15. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak, JaroslawBartnicki, Tomasz Thermomechanical Analysis of a Helical-Wedge Rolling Process for Producing Balls // Metals. October 2018. – pp. 1–14.



16. Rubtsov, V. & Shevchenko, O. (2018). Calibration of ball-rolling rollers with continuously variable pitch. *Ferrous Metallurgy Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 58-63. 10.32339/0135-5910-2018-8-58-63.

17. Korn G., Korn T. 2. 4-5. *Xarakteristicheskayakvadratichnaya forma ixarakteristicheskoeuravnenie. Spravochnikpomatematike* [Characteristic quadratic form and characteristic equation]. 4nd ed. Moscow: Nauka, 1978, 64 p. (In Russ).

18. GOST 7524–2015. *Shary' melyushhiestal'ny'edlyasharovy'xmel'nicz* [Milling steel balls for ball mills]. Moscow, Standartinform Publ., 2015, 8 p. (In Russ.).

## РАСЧЕТ УДАЛЕНИЯ СЕРЫ В АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ С ПОМОЩЬЮ ИОННОЙ ТЕОРИИ ШЛАКОВ

**Савельев Максим Владимирович,**

E-Mail: maxim.savelev@evraz.com,

АО «ЕВРАЗ НТМК»,

г. Нижний Тагил,

**Шешуков Олег Юрьевич,**

**Егиазарьян Денис Константинович,**

Уральский федеральный университет,

Институт металлургии УрО РАН,

г. Екатеринбург,

**Метелкин Анатолий Алексеевич,**

E-Mail: anatoliy82@list.ru,

**Шевченко Олег Игоревич,**

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы удаления серы в агрегате ковш-печь. Десульфурация металла в агрегатах ковшевой обработки стали, прежде всего, достигается за счет перехода серы в шлаковую фазу. На коэффициент распределения серы между металлом и шлаком влияет сульфидная емкость шлака, коэффициент активности серы в металле, окислительный потенциал среды и константа равновесия реакции распределения серы между металлом и шлаком. Существенное влияние на сульфидную емкость шлака оказывает температура жидкой фазы в ковше. Предложенная расчетная методика, основанная на положениях ионного строения шлаков, позволяет оценить концентрацию серы в стали на основании определения коэффициента ее распределения между металлом и шлаком. В качестве критерия рафинирующей способности шлаков предложена оптическая основность; показано, что особую роль в расчете этого показателя играет амфотерный оксид  $Al_2O_3$ . Выявлено его влияние на сульфидную емкость шлаков.

**Ключевые слова.** Агрегат ковш-печь, десульфурация, ионное строение шлаков, оптическая основность, сульфидная емкость шлака.

После выпуска металла из сталеплавильного агрегата все дальнейшие действия по доводке стали по химическому составу и температуре выполняются в ковше. Ковшовая металлургия призвана решить три основные задачи: рафинирование стали по неметаллическим включениям и вредным примесям; корректировка химического состава путем присадки соответствующих лигатур; гомогенизация металла по температуре и химическому составу [1, 2]. Современный уровень развития промышленности требует производства стали высокой степени чистоты по неметаллическим включениям и вредным примесям [3–6]. Одной из примесей, существенно снижающей служебные

свойства стали, содержание которой жестко регламентировано в готовой продукции, является сера. Процессам десульфурации посвящено значительное количество теоретических и практических работ, но эта тема не теряет актуальности по настоящее время [7–10].

Известно, что десульфурация металла может достигаться переводом серы в шлак [1]. Этот процесс можно реализовать в агрегате «ковш-печь», где на поверхности металла наводится свежий шлак. Шлак представляет собой многокомпонентный оксидный расплав, взаимодействующий с металлом и выполняющий важные технологические функции [1, 11, 12]. В настоящее время считается, что шлак имеет ионное строение и состоит из положительно заряженных катионов и отрицательно заряженных анионов. Доказательством ионного строения шлаков служат многочисленные рентгеноструктурные исследования застывших шлаков, электрическая проводимость расплавленных шлаков, наличие электрических зарядов в пограничных слоях металла и шлака, высокие значения поверхностного натяжения шлаков и т. д.

В расплавленных металлургических шлаках существуют ионы следующих групп [1, 13–15].

1. Катионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$
2. Анионы  $\text{O}^{2-}$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SiO}_4^{4-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{AlO}_3^{3-}$ ,  $\text{FeO}_2^{1-}$
3. В кислых шлаках могут образовываться более сложные кремнекислотные анионы  $(\text{SiO}_3^{2-})_n$ ,  $\text{Si}_3\text{O}_9^{6-}$ ,  $\text{Si}_4\text{O}_{12}^{8-}$ ,  $\text{Si}_6\text{O}_{18}^{12-}$  и т. д. [16–19].

С учетом представленных данных важно изучить десульфурацию металла с позиции ионной теории строения шлаков.

Известно, что коэффициент распределения серы между металлом и шлаком определяется по следующей формуле [20]:

$$L_S = \frac{(S)}{[S]} = C_S \cdot \gamma_{[S]} \cdot \frac{1}{p_{\{O^2\}}^{1/2}} \cdot \frac{1}{K_{[S]}}, \quad (1)$$

где  $C_S$  – сульфидная емкость шлака;

$\gamma_{[S]}$  – коэффициент активности серы в металле;

$p_{\{O^2\}}^{1/2}$  – окислительный потенциал среды;

$K_{[S]}$  – константа равновесия реакции распределения серы между металлом и шлаком.

Рассмотрим каждый сомножитель в правой части уравнения (1).

Константа равновесия реакции распределения серы между металлом и шлаком по данным [1] определяется по формуле  $\lg K_S = -\frac{6500}{T} + 2,625$ , где  $T$  – температура, К.

Для расчета значений коэффициента активности серы, растворенной в жидкой стали, по данным допустимо применять значения параметров взаимодействия:

$$\lg \gamma_S = \sum_{i=1}^n e_S^i [X_i] = e_S^1 \cdot [X_1] + e_S^2 \cdot [X_2] + \dots + e_S^i \cdot [X_i], \quad (2)$$

где  $e_S^i$  – параметр взаимодействия соответственного элемента металла с серой.

$X$  – содержание элемента в жидком железе, %.

По данным [1, 21, 22] одним из основных факторов, определяющих значение  $L_S$ , является содержание FeO в металле и шлаке

$$L_S \approx \frac{1}{p_{\{O^2\}}^{1/2}}.$$

Чем выше окислительный потенциал среды, тем меньше  $L_S$ , но данный потенциал соответствует содержанию кислорода в стали  $[O]$ , т. е.  $L_S$  зависит от окисленности металла. Таким образом, кислород, находящийся в виде оксида ( $FeO$ ) в шлаке, и кислород в металле  $[O]$  существенно уменьшает степень десульфурации.

Сульфидная емкость шлаков  $C_S$  является одной из важнейших характеристик рафинирующей способности шлаков, применяемых при внепечной обработке стали. Данная величина определяется как функция от температуры и состава шлака, т. е. это величина экспериментально определяемая и термодинамически оцениваемая [20].

Одним из факторов, влияющих на сульфидную емкость, является температура процесса. В работе [21] было изучено, как температура влияет на зависимость сульфидной емкости от оптической основности. Данные представлены на рис. 1.

Математически графики могут быть описаны уравнением (3), в интервалах температур 1650–1400 °С и при оптической основности  $\Lambda$  не более 0,75 погрешность представленной формулы не превышает 6 %.

$$\lg C_S = 14,3 \cdot \Lambda - 7,01 - \frac{9908,1}{T}. \quad (3)$$

В качестве критерия основности оксидных расплавов наиболее часто используют оптическую основность, которая характеризуется как способность анионов кислорода, присутствующих в шлаке, отдавать свои электроны ионам-акцепторам (зондовым ионам [16–19]). Для чистых оксидов оптическая основность ( $\Lambda$ ) связана с электроотрицательностью элементов по Полингу ( $X_i$ ) следующим соотношением:

$$\Lambda_i = \frac{1}{1,36 \cdot (X_i - 0,26)}. \quad (4)$$

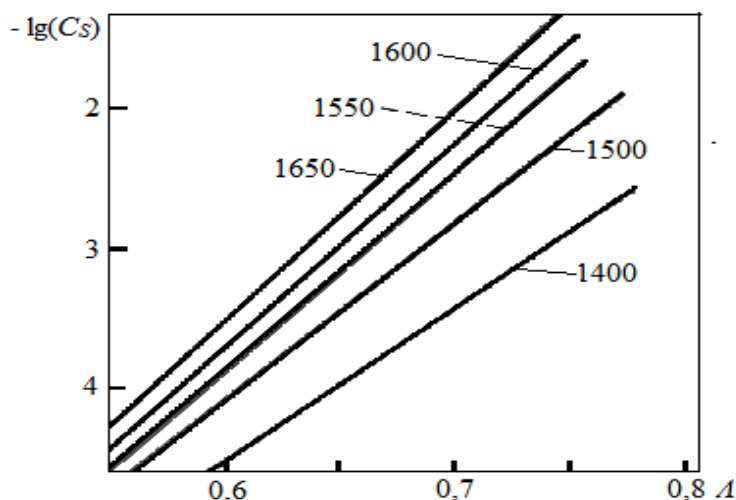


Рис. 1 Зависимость сульфидной емкости  $\lg(C_S)$  от оптической основности

В более ранних работах было определено, что оптическая основность оксида  $\Lambda$  связана с электроотрицательностью катиона по Полингу ( $X_i$ ) следующим выражением:

$$\Lambda_i = \frac{0,75}{(X_i - 0,25)}. \quad (5)$$

Применение уравнений 4 и 5 позволяет найти оптическую основность для любых многокомпонентных систем, состоящих из непереходных (не амфотерных) металлов, по следующему соотношению:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot \Lambda_i) = X_{MO_1} \cdot \Lambda_{MO_1} + X_{MO_2} \cdot \Lambda_{MO_2} + \dots + X_{MO_n} \cdot \Lambda_{MO_n} \quad (6)$$

где  $X_i$  – эквивалентная доля анионов, вносимых данным компонентом;

$\Lambda_i$  – оптическая основность компонента системы.

Для основных и кислых оксидов оптическая основность определена, также она известна и для амфотерных оксидов. Однако нами было установлено, что  $Al_2O_3$  может проявлять как основные, так и кислотные свойства, т. е. соответственно будет изменяться оптическая основность данного оксида в зависимости от состава шлака.

В металлургических шлаках, наводимых в сталеразливочном ковше на агрегате ковш-печь, содержатся оксиды, которые поглощают «свободные» анионы кислорода, например  $SiO_2$ , с образованием комплексного аниона  $SiO_4^{4-}$ , а также содержатся амфотерные оксиды, которые могут выступать как донорами, так и поглотителями свободных «анионов» кислорода. Данные параметры в классической формуле 5 не учитываются.

В предлагаемой нами расчетной формуле (7), для определения оптической основности, основные оксиды суммируются, а кислые оксиды вычитаются, дополнительно учитывается влияние амфотерного оксида  $Al_2O_3$ .

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot \Lambda_i)_{\text{осн}} - \sum_{i=1}^n (X_i \cdot \Lambda_i)_{\text{кис}} + X_{Al_2O_3} \cdot \Lambda_{Al_2O_3} \quad (7)$$

В сталеразливочном ковше в АКП наводят жидкоподвижные высокоосновные шлаки следующего химического состава (табл. 1).

Таблица 1

Состав жидкой фазы шлака агрегата ковш-печь

Значения	Состав шлака, % масс					
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	MnO
Диапазон	45,0...61,9	10,0...30,2	1,8...29,6	2,1...9,8	< 1,0	< 1,0
Среднее	54,0	22,1	13,5	7,3	–	–

Для определения влияния амфотерного оксида  $Al_2O_3$  на итоговое значение оптической основности ( $\Lambda$ ), рассчитываемой по формуле (7) были проанализированы параметры плавок фиксируемых на агрегате ковш-печь. Для каждой из плавок массива данных рассчитывались: коэффициент распределения серы между металлом и шлаком ( $L_{\text{спрак}}$ ); коэффициент активности серы в металле ( $\gamma_{[S]}$ ); окислительный потенциал среды ( $p_{[O_2]}^{1/2}$ ); константа равновесия реакции распределения серы между металлом и шлаком ( $K_{[S]}$ ); сульфидная емкость шлака ( $C_S$ ). Причем расчет сульфидной емкости осуществлялся с соблюдением условия  $L_{\text{спрак}} = L_{\text{теор}}$ , за счет варьирования оптической основности оксида  $Al_2O_3$  ( $\Lambda_{Al_2O_3}$ ). Массив исходных данных и результаты расчета представлены в табл. 2, влияние содержания  $Al_2O_3$  в гомогенной составляющей шлака на оптическую основность – на рис. 2.

Таблица 2

Показатели анализируемых плавок агрегата ковш-печь и результаты расчета

№ п/п	Ls		Cs·10 <sup>3</sup>	$\gamma_{[S]}$	Ks	P <sub>O2</sub> 10 <sup>-8</sup>	$\Lambda_{Al_2O_3}$	Состав, % масс				T, °C
	факт	расчет						CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	
1	11,11	11,88	0,10	1,05	390,73	2,27	0,50	50,34	14,16	22,44	11,17	1557
2	16,33	18,80	0,13	1,06	394,80	1,80	0,47	51,45	12,74	21,63	8,75	1553
3	28,04	28,72	0,37	1,06	360,20	3,75	0,44	53,95	15,98	19,80	9,25	1589
4	26,32	34,89	0,36	1,06	374,07	2,89	0,38	55,15	17,91	19,05	6,84	1574
5	27,53	32,82	0,32	1,02	372,17	2,66	0,34	54,04	16,15	19,06	8,58	1576
6	25,23	29,49	0,21	1,06	390,73	1,96	0,34	52,63	17,62	19,11	8,90	1557
7	40,39	40,52	0,43	1,03	365,65	3,01	0,33	55,68	19,38	18,02	6,38	1583
8	12,00	13,15	0,28	1,01	358,40	5,91	0,33	53,65	17,22	19,20	8,03	1591
9	23,31	27,34	0,23	1,05	390,73	2,27	0,31	52,52	18,77	18,35	8,86	1557
10	30,78	31,65	0,52	1,17	366,58	5,28	0,20	54,59	24,00	14,66	5,77	1582
11	20,05	20,18	0,16	1,06	389,72	2,11	0,20	51,91	19,04	17,98	8,93	1558
12	19,07	20,20	0,44	1,17	367,50	6,94	0,16	54,09	24,61	14,28	6,04	1581

Из представленных данных видно, что с увеличением содержания  $Al_2O_3$  в шлаке снижается оптическая основность данного оксида, которая может быть определена следующим выражением:

$$\Lambda_{Al_2O_3} = 1,65 \cdot e^{-0,0908 \cdot X}, \quad (7)$$

где  $\Lambda_{Al_2O_3}$  – оптическая основность оксида  $Al_2O_3$ ;

$X$  – содержание оксида в гомогенной составляющей металлургического шлака;

$e$  – основание натурального логарифма.

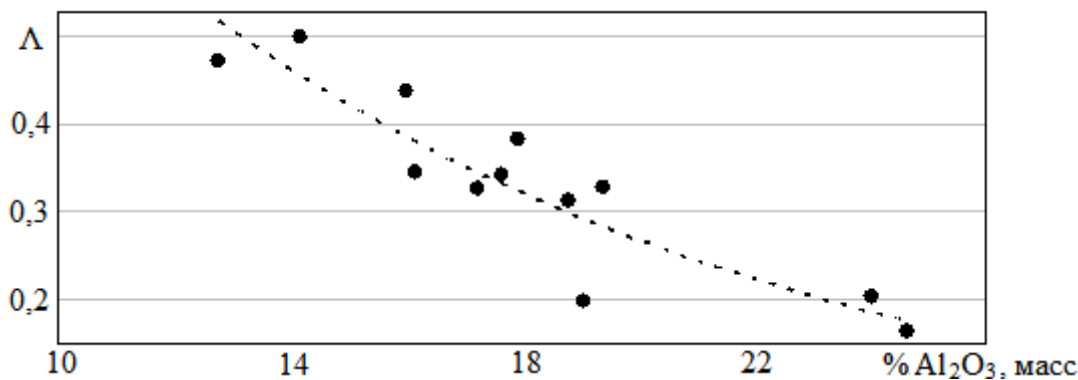


Рис. 2 Зависимость оптической основности от содержания  $Al_2O_3$  в гомогенной составляющей шлака

Следовательно, оптическая основность для гетерогенных шлаков, наводимых в сталеразливочном ковше в АКП, может быть определена следующим выражением:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n (X_i \cdot \Lambda_i)_{\text{ОСН}} - \sum_{i=1}^n (X_i \cdot \Lambda_i)_{\text{КИС}} + X_{Al_2O_3} \cdot 1,65 \cdot e^{-0,0908 \cdot X}, \quad (8)$$

где  $X_i$  – эквивалентная доля анионов, вносимых данным компонентом;

$\Lambda_i$  – оптическая основность компонента системы;

$X$  – содержание оксида в гомогенной составляющей металлургического шлака.

По значению оптической основности (8) определяются сульфидная емкость шлака, коэффициент распределения серы между металлом и шлаком и, как результат, содержание серы в металле.

Итак, десульфурация металла в агрегатах ковшевой обработки стали, прежде всего, достигается за счет перехода серы в шлаковую фазу. На коэффициент распределения серы между металлом и шлаком влияет сульфидная емкость шлака, коэффициент активности серы в металле, окислительный потенциал среды и константа равновесия реакции распределения серы между металлом и шлаком. Существенное влияние на сульфидную емкость шлака оказывает температура жидкой фазы в ковше. Предложенная расчетная методика, основанная на положениях ионного строения шлаков, позволяет оценить концентрацию серы в стали на основании определения коэффициента ее распределения между металлом и шлаком. В качестве критерия рафинирующей способности шлаков предложена оптическая основность, показано, что особую роль в расчете этого показателя играет амфотерный оксид  $Al_2O_3$ .

#### Библиографический список

1 БИГЕЕВ, А. М., *Металлургия стали. Теория и технология плавки стали* : учеб. для вузов / А. М. Бигеев, В. А. Бигеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Магнитогорск : МГТУ, 2000. – 544.

2. FANDRICH, R., LÜNGEN, H.-. and WUPPERMANN, C.–., 2008. Actual review on secondary metallurgys. *Revue de Metallurgie.Cahiers D'Informations Techniques*, **105**(7-8), pp. 364–374.
3. УШАКОВ А. Н., БИГЕЕВ В. А., СТОЛЯРОВ А. Н., ПОТАПОВА М. В., 2019. Технология производства трубной ультранизкосернистой стали. *Черные металлы*, 2019(12), с. 26–31.
4. FANDRICH, R., LUNGEN, H.B. and WUPPERMANN, C.–., 2008. Secondary metallurgy – State of the art and research trends in Germany. *Stahl und Eisen*, 128(2), pp. 45–53.
5. USHAKOV, S. N., BIGEEV, V. A., STOLYAROV, A. M. and POTAPOVA, M. V., 2018. Ladle Desulfurization of Converter Low-Sulfur Pipe Steel. *Metallurgist*, **62**(7–8), pp. 667–673.
6. УШАКОВ С. Н., АВРАМЕНКО В. А., БИГЕЕВ В. А., СТОЛЯРОВ А. М., ПОТАПОВА М. В. 2017. Производство трубной низкосернистой стали с ковшовой десульфурацией чугуна / *Металлург*, **11**, с 47–50.
7. TURKDOGAN, E. T., 1983. Ladle deoxidation, desulphurisation and inclusions in steel – 1. Fundamentals. *Archiv fur das Eisenhüttenwesen*, **54**(1), pp. 1–10.
8. PLUSCHKELL, W., 1990. Metallurgical reaction techniques for adjusting very low contents of C, P, S and N in steel. *Stahl und Eisen*, **110**(5), pp. 61–70.
9. JONSSON, L., SICHEN, D. and JÖNSSON, P., 1998. A New Approach to Model Sulphur Refining in a Gas-stirred Ladle – A Coupled CFD and Thermodynamic Model. *ISIJ International*, **38**(3), pp. 260–267.
10. CAO, Q., PITTS, A. and NASTAC, L., 2018. Numerical modelling of fluid flow and desulphurisation kinetics in an argon-stirred ladle furnace. *Ironmaking and Steelmaking*, **45**(3), pp. 280–287.
11. TURSUNOV, N. K., SEMIN, A. E. and SANOKULOV, E. A., 2016. Study of desulfurization process of structural steel using solid slag mixtures and rare earth metals. *Chernye Metally*, (4), pp. 32–37.
12. TURSUNOV, N. K., SEMIN, A. E. and KOTELNIKOV, G. I., 2017. Kinetic features of desulphurization process during steel melting in induction crucible furnace. *Chernye Metally*, (5), pp. 23–29.
13. KAPUSTIN, E. A. and KHARLASHIN, P. S., 2001. Theoretical principles of metallurgical technology. *Steel in Translation*, 31(12), pp. 15–18.
14. KONOPLYA, V. G. and KHARLASHIN, P. S., 2002. Thermodynamic and kinetic analysis of mass transfer of sulfur in slag-metal melts during application of low-sulfur cast iron. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, (4), pp. 56–59.
15. KHARLASHIN, P. S., KOLOMIYTSEVA, Y. S., GRIGORYEVA, M. A. and BAKLANSKIY, V. M., 2010. Kinetics of desulfurization and resulfurization when low-sulfur steel making at the stage of oxidizing refining. *Metallurgical and Mining Industry*, **2**(4), pp. 267–270.
16. NOVIKOV, V. K., 1989. Development of a polymeric model of molten silicates. *Melts Moscow*, **1**(6), pp. 501–512.
17. NOVIKOV, V. K. and MAIFAT, M. V., 1989. Application of polymeric model to the calculation of surface tension in multicomponent silicate melts. *Melts Moscow*, **2**(3), pp. 218–221.
18. NOVIKOV, V. K., SPIRIDONOV, M. A. and ZINOV'EVA, I. S., 1998. Thermochemical basicity indexes of oxides. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 72(2), pp. 173–176.
19. NOVIKOV, V. K., SPIRIDONOV, M. A. and SANGALOVA, I. S., 2008. Chemical thermodynamics and elements of structure in oxide melts. *Journal of Physics: Conference Series*, 98(1), № 012020.

20. BURMASOV, S. P., GUDOV, A. G., YAROSHENKO, Y. G., MELING, V. V. and DRESVYANKINA, L. E., 2015. Mass transfer in the ladle refining of steel with gas mixing. *Steel in Translation*, **45**(9), pp. 635–639.

21. SOMMERVILLE, I. D., 1986. Measurement, prediction and use of capacities of metallurgical slags. Scaninject IV: 4th International Conference on Injection Metallurgy.; Lulea, Swed 1986, pp. 8. 1–8. 21.

22. SOMMERVILLE, I. D. and MASSON, C. R., 1992. Group optical basicities of polymerized anions in slags. *Metallurgical Transactions B*, **23**(2), pp. 227–229.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕРЫ ПО ПЕРЕДЕЛАМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА АО «ЕВРАЗ НТМК»

**Савельев Максим Владимирович,**

E-Mail: maxim.savelev@evraz.com,

**Ткачев Андрей Сергеевич,**

АО «ЕВРАЗ НТМК»,

г. Нижний Тагил,

**Шешуков Олег Юрьевич,**

Уральский федеральный университет,

Институт металлургии Уральского отделения РАН,

г. Екатеринбург,

**Метелкин Анатолий Алексеевич,**

E-Mail: anatoliy82@list.ru,

**Шевченко Олег Игоревич,**

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ,

**Шмаков Степан Валерьевич,**

АО «ЕВРАЗ НТМК»,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ,

г. Нижний Тагил

**Аннотация.** Современный уровень развития промышленности требует производства стали высокой степени чистоты вредным примесям. Одной из примесей, существенно снижающей служебные свойства, содержание которой жестко регламентировано в готовой продукции, является сера. Глубокая десульфурация может быть достигнута разработкой сквозной технологии получения металла как единого процесса, включающего аглодоменное и сталеплавильное производства. В данной работе изучено распределение серы по металлургическим переделам от сырьевых материалов доменного процесса до стальных непрерывнолитых заготовок. Показано, удаление серы из полупродукта на установке десульфурации не обеспечит требуемое (менее 0,005 %) содержание серы в стальном слитке. Установлено, что для получения итогового содержания серы менее 0,005 % в стали необходим комплекс мероприятий, включающий обработку полупродукта на установке десульфурации, выплавку в конвертере, обработку стали на установке ковш-печь и далее в вакууматоре. Как показали исследования коэффициента распределения серы между металлом и шлаком, несмотря на низкое конечное содержание серы в металле, данная технология имеет резервы в части десульфурации, достигаемой корректировкой состава шлака АКП.

**Ключевые слова.** Баланс серы, установка десульфурации, агрегат ковш-печь (АКП), коэффициент распределения серы.

Современный потребитель металлургической продукции предъявляет все более высокие требования к качеству выпускаемой стали. Наиболее жестким ограничением по содержанию в металле подвергается сера [1]. Значительное количество теоретических и практических работ посвящено глубокой десульфурации металла с целью получения низких содержаний серы в готовой продукции. Особую актуальность это направление имеет для производства высокопрочных сталей (сосудов высокого давления, нефтегазовых труб большого диаметра [2–4]), листовых сталей для глубокой вытяжки [5, 6], арматурных сталей [7, 8], а также сталей массового производства [9, 10]. Стали с регламентировано низким содержанием серы востребованы для авиации, энергетического, транспортного машиностроения, строительства и др. отраслей промышленности [11–13].

Рост требований к свойствам стали, как правило, опережает развитие технологических приемов, направленных на повышение чистоты металла. Вследствие этого необходим поиск сочетаний эффективных способов рафинирования на всех переделах металлургического производства. В настоящее время ни один вид металлургического сырья не используется без предварительной подготовки, что позволяет уже на стадии подготовки шихты к доменной плавке проводить мероприятия по удалению серы [14, 15]. Поведение серы при окусковании железорудных материалов изучено достаточно хорошо, поэтому при правильной организации процесса достигается высокая степень удаления ее без ущерба для прочностных и других характеристик окускованных материалов. Значительная работа по удалению серы из металла осуществляется в доменном процессе и при обработке чугуна после него. Непрерывный режим десульфурации, реализуемый в домне, эффективнее всех периодических процессов, предлагаемых в качестве альтернативных вариантов. Особое значение приобретает качество чугуна для конвертерного передела, где возможности по удалению серы ограничены [16–19].

Обработка стали на агрегате ковш-печь является неотъемлемой частью производства высококачественного металла [16], технология предусматривает наведение нового высокоосновного, жидкоподвижного шлака. С ростом толщины слоя шлака и его основности уменьшается конечная концентрация серы в стали. Продолжительность продувки расплава аргоном, увеличение интенсивности продувки и рост температуры стали также приводят к уменьшению концентрации серы. При увеличении начальной концентрации серы и окисленности шлака условия десульфурации ухудшаются [17].

Особое место серы среди примесей, входящих в состав сталей, связано с ее влиянием на механические свойства. Повышение содержания серы вызывает красноломкость, понижает ударную вязкость, коррозионную стойкость, электротехнические свойства, а ухудшение пластических свойств приводит к массовому браку при штамповке пустотелых деталей глубокой вытяжки из листовой стали [1, 11, 18].

Сера имеет неограниченную растворимость в жидком железе (до 38 % при содержании ее в FeS 36,5 %), а растворимость в твердом железе ограниченная: в  $\gamma$ -Fe при 1365 °C ~0,055 %, а в  $\alpha$ -Fe при 900 °C  $\leq$  0,015 % и при комнатной температуре ~0,0001 % [1]. При переходе металла из жидкого состояния в твердое, растворимость серы в нем резко уменьшается и продолжает уменьшаться при охлаждении твердого металла от температуры кристаллизации до комнатной температуры. То есть, затвердевание и охлаждение металла с повышенным содержанием серы приведет к образованию эвтектики и выделению из твердого раствора сульфида железа FeS.

Эвтектика Fe-FeS имеет низкую, в сравнении с температурой солидус стали, температуру плавления (985 °C). В присутствии кислорода из-за образования окисульфидов эвтектическая кристаллизация происходит при еще более низкой температуре. Наличие жидкой фазы по границам зерен в сочетании с усадочными напряжениями слитка или деформациямиковки, прокатки и т. п. приведет к образованию трещин. Такое явление получило название – красноломкость. Негативное влияние сера



также оказывает на ударную вязкость стали при низких температурах (менее  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), охрупчивая металл. Повышенное содержание серы приводит к резкой анизотропии свойств в готовом прокате рис. 1 [1]. Анизотропия механических характеристик, зависящая от взаимной ориентации сульфидных включений, наиболее проявляется на пластических свойствах металла – относительном удлинении, относительном сужении и особенно ударной вязкости.

Однако из рис. 1 видно, что при содержании серы менее 0,005 %, ударная вязкость стали в поперечных образцах незначительно меньше чем в поперечных, т. е. металл по своим свойствам становится однородным по всему объему.

Таким образом, содержание серы в металле, не влияющее на однородность его свойств, принимается не более 0,005 %. Однако, для гарантированного отсутствия влияния ее содержание быть еще меньше и не превышать 0,0001 %, – предела растворения данного элемента в железе при стандартных условиях [1].

Готовая сталь в том или ином количестве содержит все примеси, входящие в состав не только металлических шихтовых материалов, но и в состав шлаковой и газовой фаз и футеровки, поэтому содержание серы в конечном продукте зависит, как от технологии производства, так и от используемых сырьевых материалов. Под переделом в металлургии обычно подразумевается переработка материала, при которой существенно изменяются химический или фазовый состав продукта, физико-механические свойства. Для достижения требуемых результатов по удалению серы из металла необходимо проанализировать основные источники ее поступления в расплав, а также технологические факторы, влияющие на процесс десульфурации в каждом переделе.

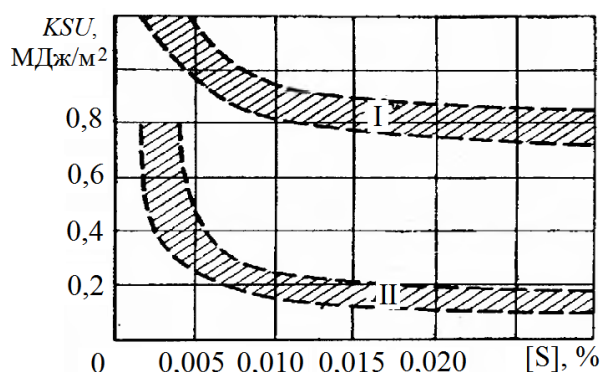


Рис. 1 Зависимость ударной вязкости стали, раскисленной алюминием, от содержания серы, установленная для продольных (I) и поперечных (II) образцов проката при комнатной температуре

Классическая схема производства стали включает в себя следующие стадии:

- 1) получение рудного концентрата (добыча руды, производство агломерата, окатышей);
- 2) доменный процесс (производство чугуна);
- 3) внедоменная десульфурация чугуна;
- 4) кислородно-конвертерный процесс, производство стали;
- 5) обработка стали в агрегате ковш-печь (АКП);
- 6) обработка металла на установках пониженного давления;
- 7) разливка стали в машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

На каждом из этапов, в зависимости от физико-химических процессов, проводимых в металлургическом агрегате, будет изменяться содержание серы в металле.

В зависимости от химического состава чугуна используют несколько специальных технологических вариантов передела его в сталь. На предприятии АО «ЕВРАЗ НТМК» реализован ванадиевый перелел – переработка ванадиевых чугунов в сталь и ванадиевый шлак. Классическая схема отличается наличием дуплекс процесса – двухстадийного конвертерного передела. Первая стадия заключается в извлечении ванадия из чугуна

и перевод его в виде оксидной фазы в шлак. Результатом этой стадии является получение полупродукта (деванадированного чугуна) и ванадиевого шлака. После извлечения ванадия металлический расплав, с содержанием углерода 2,6–3,5 %, поступает на переработку в конвертер для получения стали с заданным химическим составом – это вторая стадия. Между двумя стадиями конвертерного передела полупродукт может подаваться на установку десульфурации. Изменение содержания серы в металле по этапам металлургического передела представлено в табл. 1.

Таблица 1

Распределение серы по этапам производства стали, при различных вариантах технологии

Этапы производства стали	Содержание серы в металле или сырье, % масс			
	Без обработки на установке десульфурации		С обработкой на установке десульфурации	
	Без обработки	Обработка на установке циркуляционного вакуумирования	Без обработки	Обработка на установке циркуляционного вакуумирования
Получение рудного концентрата и топлива доменной печи	Руда		0,006	
	Агломерат и окатыши (ЖРС)		0,009	
	Кокс		0,59	
	Пылеугольное топливо		0,34	
Доменный процесс	0,0249			
Конвертерный процесс 1	0,0244			
Десульфурация полупродукта	–	–	0,0068	0,0068
Конвертерный процесс 2	0,0196	0,0206	0,0083	0,0085
АКП (начало обработки)	0,0192	0,0196	0,0084	0,0086
АКП (конец обработки)	0,012	0,0126	0,0046	0,0057
Циркуляционный вакууматор	–	0,008	0,0039	0,0057
МНЛЗ	0,012	0,008	0,0039	0,0057

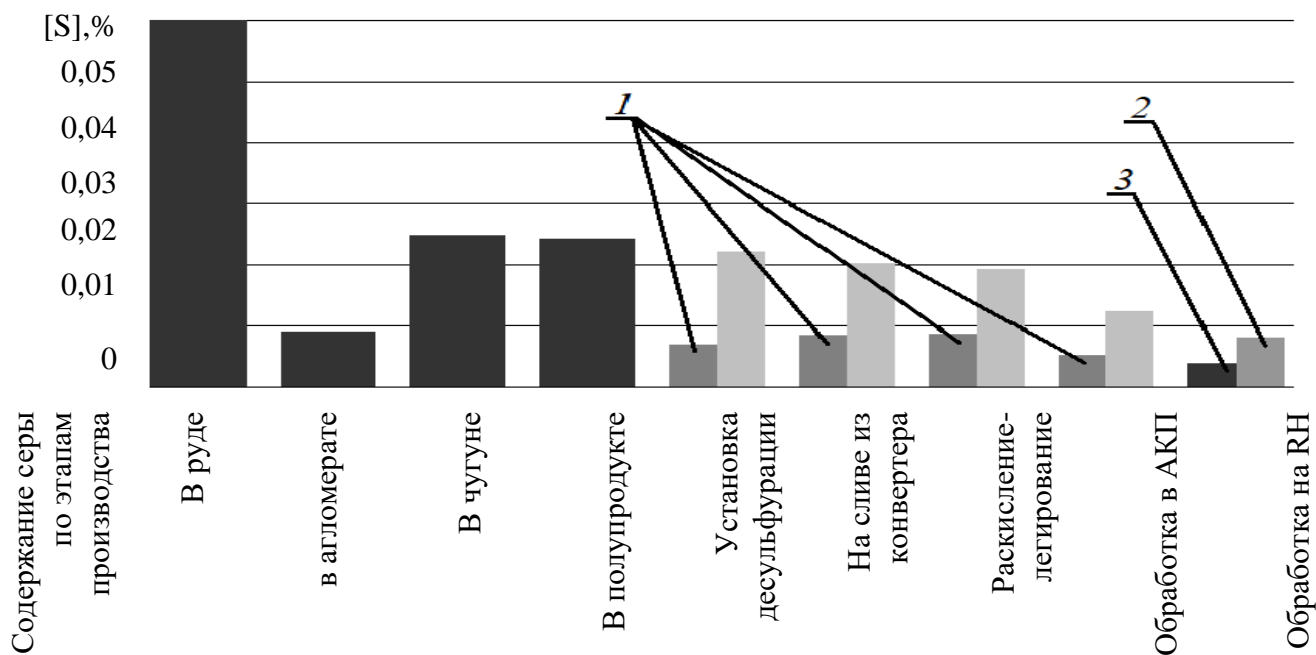


Рис. 2 Диаграмма распределения серы по этапам производства АО «ЕВРАЗ НТМК»: 1 – плавки, обработанные на установке десульфурации, 2 – плавки, обработанные на циркуляционном вакууматоре, 3 – плавки, обработанные на установке десульфурации и циркуляционном вакууматоре

Графически изменение содержание серы и степень ее изменения по переделам производства представлено на рис. 2 и 3.

Из представленных на рисунках данных видно, что содержание серы после обработки на установке десульфурации соответствует 0,0068 %, что недостаточно для исключения влияния вредной примеси на служебные свойства изделий. Минимальное содержание серы в металле достигает значений 0,0039 % только при полном комплексе обработки металла в агрегатах внепечной обработке стали – ковш-печь и циркуляционный вакууматор.

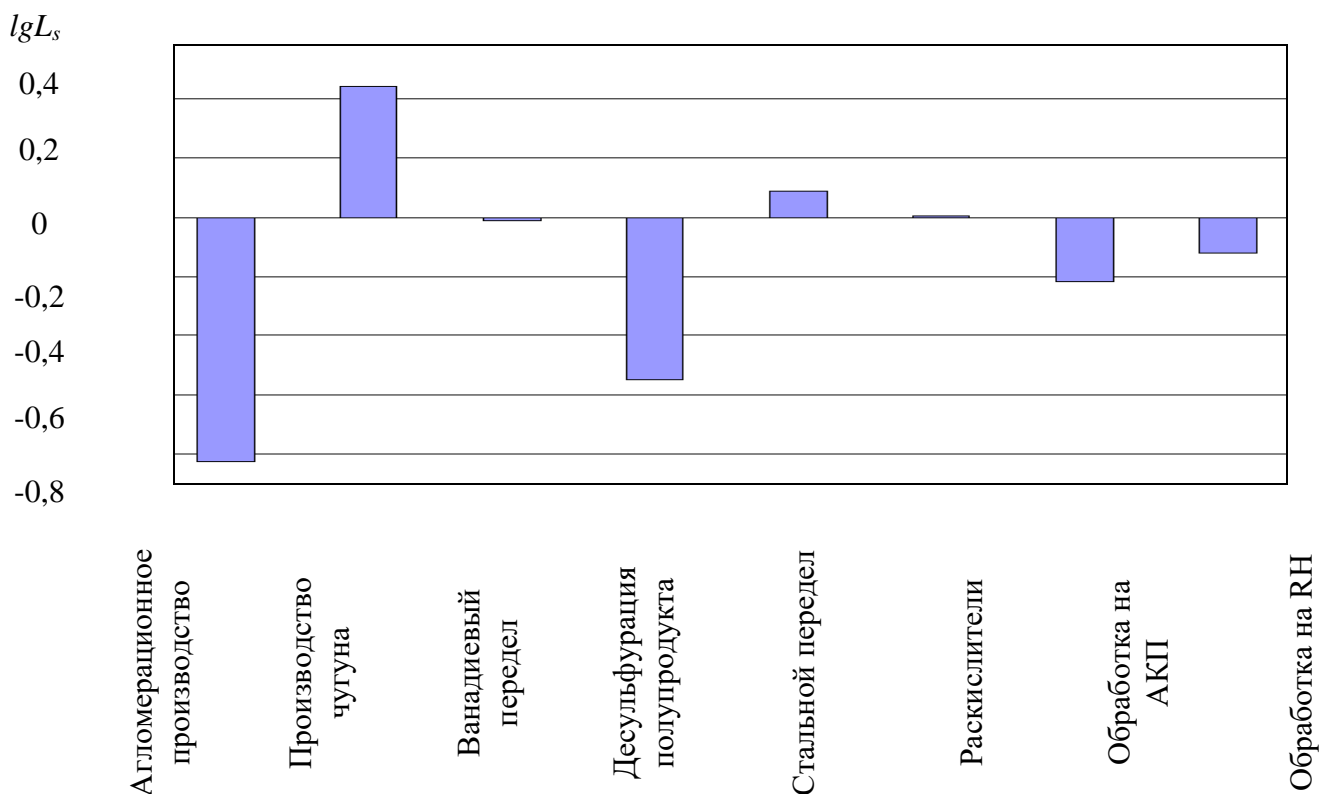


Рис. 3 Изменение коэффициента распределения содержания серы по этапам производства АО «ЕВРАЗ НТМК»

С целью изучения распределения серы ( $L_S$ ) между металлом и шлаком в установке АКП составим систему уравнений (1)–(3).

$$M \cdot [S]_0 + m \cdot (S)_0 = M \cdot [S]_к + m \cdot (S)_к \quad (1)$$

где  $(S)_0$  – начальное содержание серы в шлаке принимаем равным нулю;

$[S]_0$  – начальное содержание серы в металле;

$[S]_к$  – конечное содержание серы в металле;

$(S)_к$  – конечное содержание серы в шлаке;

$M$  – средний вес плавки (152,0 т);

$m$  – масса шлака в сталеразливочном ковше АКП (1,98 т)

$$L_S = \frac{(S)_к}{[S]_к} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{m}{M}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – отношение масс шлака и металла.

Из уравнений (1)–(3) определим коэффициент распределения серы между металлом и шлаком  $L_S$ :

$$L_S = \frac{\left( \frac{[S]_0}{[S]_K} - 1 \right)}{\lambda} \quad (4)$$

Применим формулу (4) и данные табл. 1 для расчета средних значений коэффициента распределения серы между металлом и шлаком. Сопоставим расчетное значение  $L_S = 47,0$  с данными источников [1] ( $L_S = 50 \dots 100$ ) и [20] ( $L_S \approx 50 \dots 250$ ). Несмотря на «удовлетворительное» конечное содержание серы в металле (менее 0,005 %), технология производства стали, включающая этапы: обработка полупродукта на установке десульфурации, обработка стали в АПК и вакууматоре, имеет резервы по удалению серы. Корректировкой состава шлака АКП можно добиться повышения их десульфурующей способности.

Итак, современный уровень развития промышленности требует производства стали высокой степени чистоты вредным примесям. Одной из примесей, существенно снижающей служебные свойства, содержание которой жестко регламентировано в готовой продукции, является сера. Глубокая десульфурация может быть достигнута разработкой сквозной технологии получения металла как единого процесса, включающего аглодоменное и сталеплавильное производства. В данной работе изучено распределение серы по металлургическим переделам от сырьевых материалов доменного процесса до стальных непрерывнолитых заготовок. Показано, удаление серы из полупродукта на установке десульфурации не обеспечит требуемое (менее 0,005 %) содержание серы в стальном слитке. Установлено, что для получения итогового содержания серы менее 0,005 % в стали необходим комплекс мероприятий, включающий обработку полупродукта на установке десульфурации, выплавку в конвертере, обработку стали на установке ковша-печь и далее в вакууматоре. Как показали исследования коэффициента распределения серы между металлом и шлаком, несмотря на низкое конечное содержание серы в металле, данная технология имеет резервы в части десульфурации, достигаемой корректировкой состава шлака АКП.

#### Библиографический список

1. BIGEEV A. M. Metallurgiya stali. Teoriya i tekhnologiya plavki stali [Tekst] : ucheb. dlya vuzov / A. M. BIGEEV. V. A. BIGEEV. – 3-e izd.. pererab. i dop. – Magnitogorsk : MGTU. 2000. – 544. (in Russian).
2. USHAKOV, A. N., BIGEEV, V. A., STOLYAROV, A. N. and POTAPOVA, M. V., 2019. Technology for production of pipeline ultra low sulfur steel. *Chernye Metally*, **2019**(12), pp. 26–31.
3. USHAKOV, S. N., BIGEEV, V. A., STOLYAROV, A. M. and POTAPOVA, M. V., 2018. Ladle Desulfurization of Converter Low-Sulfur Pipe Steel. *Metallurgist*, **62**(7–8), pp. 667–673.
4. USHAKOV, S. N., AVRAMENKO, V. A., BIGEEV, V. A., STOLYAROV, A. M. and POTAPOVA, M. V., 2018. Manufacture of Low-Sulfur Pipe Steel with Ladle Desulfurization of Cast Iron. *Metallurgist*, **61**(11–12), pp. 967–970.
5. GORKUSHA, D. V., GRIGOROVICH, K. V., KARASEV, A. V. and KOMOLOVA, O. A., 2019. Content modification of different types of nonmetallic inclusions during low-carbon if steel ladle treatment. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, **62**(5), pp. 345–352.
6. GHOSH, P., GHOSH, C. and RAY, R. K., 2009. Precipitation in interstitial free high strength steels. *ISIJ International*, **49**(7), pp. 1080–1086.

7. SHEREMET, V. A., KEKUKH, A. V., RAZDOBREEV, V. G., KUVAEV, V. N. and IVANOV, D.A., 2004. Influence of conditions of thermomechanical treatment on structures, mechanical and service properties of thermally strengthened reinforcing bars of A1000 class. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, (11), pp. 40–43.
8. SHEREMET, V. A., KEKUKH, A. V., RAZDOBREEV, V. G., KUVAEV, V. N. and IVANOV, D.A., 2004. Influence of the thermomechanical-treatment conditions on the structure and properties of thermohardened class-A1000 reinforcement. *Steel in Translation*, **34**(11), pp. 59–62.
9. SIYASIYA, C. W. and STUMPF, W. E., 2008. The effects of hot rolling process and the nitrogen and sulphur content on the microstructural development of aluminium killed hot rolled low carbon strip steel. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, **108**(8), pp. 481–489.
10. LI, Y.-., ZHU, F.-., CUI, F.-. and FANG, K., 2007. Analysis of forming mechanism of lamination defect of steel plate. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*, **28**(7), pp. 1002–1005.
11. YUGOV, P. I. and BAEVA, L. A., 2004. Technological principles of the production of clean cold-resistant steels from pig iron with low contents of manganese and silicon. *Metallurgist*, **48**(7–8), pp. 307–310.
12. PIKE, T. J., 2000. Production and metallurgy perspective of modern constructional steels, *Proceedings - Annual Technical Session, Structural Stability Research Council 2000*, pp. 14–30.
13. TURSUNOV, N. K., SEMIN, A. E. and SANOKULOV, E. A., 2017. Study of dephosphoration and desulphurization processes in the smelting of 20GL steel in the induction crucible furnace with consequent ladle treatment using rare earth metals. *Chernye Metally*, (1), pp. 33–40.
14. INABA, S. and KIMURA, Y., 2004. Behavior of sulfur in the carbon-bearing iron oxide pellet during heating. *ISIJ International*, **44**(12), pp. 2112–2114.
15. PARK, J.-. and JUNG, S.-., 2016. Effects of various slag systems on metal/slag separation of CCA and slag composition on desulfurization and dephosphorization of iron nugget, *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts 2016* 2016, pp. 1025–1030.
16. SEROV, Y. V. and MIKHALEVICH, A. G., 1982. Effectiveness of conversion pig improvement to meet steelmaking requirements. *Metallurgist*, **26**(2), pp. 37–43.
17. SCHRAMA, F., VAN DEN BERG, B. and VAN HATTUM, G., 2015. A comparison of the leading hot metal desulphurization methods, *Proceedings of the 6th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking, ICS 2015* 2015, pp. 61–66.
18. SCHRAMA, F., VAN DEN BERG, B. and VAN HATTUM, G., 2015. Electric steelmaking : Comparing hot metal desulphurisation methods. *Steel Times International*, **39**(4), pp. 42–49.
19. BOL'SHAKOV, V. I., SHEVCHENKO, A. F., YE, L. D., ALEKSANDROV, V. A., SEN, S.T., BASHMAKOV, A. M. and TROTSSENKO, E. A., 2009. Rational ladle treatment for desulfurization of hot metal. *Steel in Translation*, **39**(4), pp. 326–333.
20. UMEZAWA, K. and KALOKA, H., 1977. SLAG METAL REACTIONS AND REFINING ABILITIES OF THE LADLE FURNACE. *Tetsu-To-Hagane/Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, **63**(13), pp. 2034–2042.

## ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НОЖЕЙ ШРЕДЕРОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ «W–MoS<sub>2</sub>»

Сидорова Кристина Владимировна,

E-Mail: [sidorovaK19971997@mail.ru](mailto:sidorovaK19971997@mail.ru),

Пыриков Павел Геннадьевич,

Брянский государственный технический университет,  
г. Брянск

**Аннотация.** В статье обоснована актуальность технологического обеспечения работоспособности шредеров для переработки твердых бытовых отходов. Проанализированы показатели твердых бытовых отходов, принятые в качестве факторов, влияющие на наработку на отказ рабочих органов машин. Предложены технические решения, обеспечивающие повышение работоспособности (износостойкости) ножей шредеров. В работе проведено исследование совмещения эффектов износостойкости и невысокого коэффициента трения перерабатываемого материала к поверхностям режущего инструмента шредера за счет формирования покрытий на основе системы W–MoS<sub>2</sub>.

**Ключевые слова.** Утилизация ТБО, шредеры, хромирование, дисульфид молибдена.

По данным Росприроднадзора, в 2018 г. в России образовалось 6 220,6 млн т отходов. За период с 2014 по 2018 гг. количество отходов увеличилось на 1 068 млн т (рис. 1) [2].

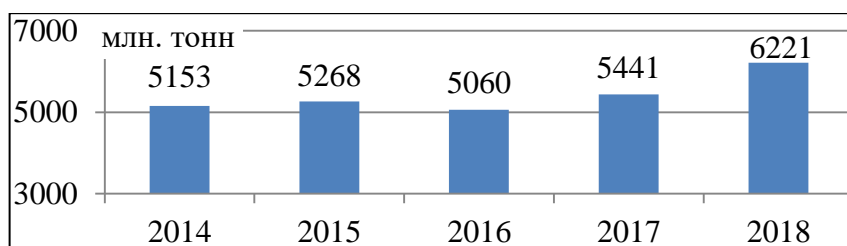


Рис. 1 Динамика показателей объема образования отходов производства и потребления в России

Низкая доля утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) и рост объема отходов производства и потребления в России напрямую связаны с малым количеством мусороперерабатывающих заводов. В стране функционирует лишь 41 мусоросжигательных и 243 мусороперерабатывающих заводов, а также 53 мусоросортировочных комплекса.

Согласно пункту 3.3 ГОСТ Р 53691–2009, ТБО представляют собой отходы потребления, образующиеся у населения, в т. ч. при приготовлении пищи, уборке и ремонте жилых помещений, содержании придомовых территорий и мест общего пользования, содержании в жилых помещениях домашних животных и птиц, а также устаревшие, пришедшие в негодность предметы домашнего обихода [1].

На сегодняшний момент более 90 % ТБО в России подвергается захоронению. В стране управление ТБО сводится к формированию контейнерного сбора отходов и их своевременному удалению из мест скопления, т. е. формируется единый поток ТБО. Такой способ ведет к нерациональному использованию природных ресурсов, значительным экономическим потерям и масштабной экологической угрозе.

Существует множество способов переработки ТБО: полигонное захоронение, термическая обработка (сжигание), газификация, высокотемпературный и низкотемпературный пиролиз, аэробное и анаэробное компостирование, брикетирование.

Среди наиболее применимых методов уменьшения габаритов отходов выделяют метод дробления и измельчения, связанный с перспективой получения мелкофракционного технологического полуфабриката, используемого в производстве топливных брикетов, а также для удобства транспортирования в места дальнейшей утилизации и вторичной переработки.

Измельчителями выступают шредеры, рабочим органом которых является ножевой ротор (один или четыре) с комплектом сменных режущих инструментов (рис. 2) [3].

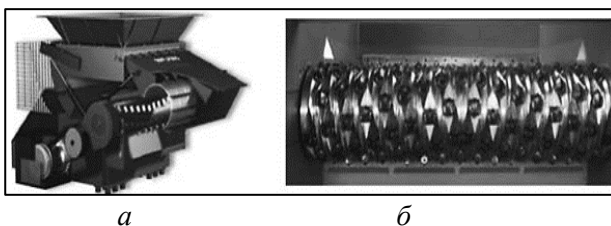


Рис. 2, а – общий вид однороторного шредера; б – рабочий орган одноножевого ротора

Эксплуатационная надежность шредера во многом зависит от качества работоспособности (стойкости) режущих инструментов. Поскольку сервисных центров, занимающихся обслуживанием шредеров в России недостаточно, а оборудование преимущественно импортного производства, необходимо осуществлять своевременный ремонт установок.

Существует множество технических решений, повышающих работоспособность режущих ножей шредера (наплавка, напайка пластин твердого сплава, нанесение антифрикционных покрытий и т. д.). Данные улучшения ресурса рабочих органов шредера реализуются преимущественно за счет увеличения износостойкости поверхности режущих ножей при их модифицировании.

Одним из характерных признаков снижения работоспособности ножей является образование адсорбированных продуктов переработки в прикромочных зонах, что приводит к изменению кинетики процесса резания и ухудшению режущей способности. Для предотвращения образования очагов налипания на поверхность ножей представляется целесообразным выполнять хромирование с последующей механической обработкой.

Поверхности режущих элементов (ножей), подлежащих хромированию после механической обработки, должны иметь шероховатость не более 1,25 мкм и подвергаться обезводородиванию путем нагрева в масле или в сушильном шкафу при температуре от 150 до 200 °С в течение 2–3 ч.

Среди основных преимуществ использования данной технологии повышения работоспособности ножей шредеров является повышение твердости, теплостойкости, антикоррозионных свойств и износостойкости [4].

Рассмотрим способ повышения работоспособности ножей шредеров при помощи покрытия вольфрам – дисульфид молибдена ( $W-MoS_2$ ).

По сравнению с другими твердыми смазочными материалами, такими как графит, гексагональный нитрид бора, система  $W-MoS_2$  обладает высокими противоизносными и смазочными свойствами на воздухе при температуре до 400 °С и в вакууме до 1000 °С. Дисульфид вольфрама ( $WS_2$ ) обладает высокой термостойкостью на воздухе и создает на поверхности защитную пленку с повышенной несущей способностью, устойчивую к воздействию агрессивных сред; работоспособен в вакууме до 1300 °С; способен обеспечить коэффициент трения ниже 0,05. Дисульфид молибдена ( $MoS_2$ ) образует на поверхности стойкую пленку, характеризующуюся высоким сопротивлением

продавливания и высоким пределом текучести; позволяет достичь наибольшего антифрикционного эффекта; устойчив к внешним воздействиям (не растворяется в воде, синтетических и органических маслах).

$WS_2$  и  $MoS_2$  имеют сходство с кристаллическим строением графита, что указывает на эффективность твердых смазок для узлов трения в условиях повышенных температур, контактных нагрузок и скоростей скольжения. Это применительно для различных трущихся пар при условии ввода твердой смазки непосредственно на поверхности трения обслуживаемых узлов трения.

Однако существует ограничение для применения покрытия  $W-MoS_2$  – высокая стоимость  $WS_2$  (в 3–3,5 раза дороже в сравнении с недорогим  $MoS_2$ ) и отсутствие его на товарном рынке.

Что касается  $MoS_2$ , то одним из основных его назначений является улучшение эффективности показателей различных смазочных материалов (смазки, присадки, покрытия).

Очередным способом, повышающим работоспособность режущих ножей шпедеров, будет являться применение технологии антифрикционных твердосмазочных покрытий (АТСП), производимых российской компанией «*MODENGY*» (г. Брянск).

В состав покрытия входят высокодисперсные частицы твердых смазочных материалов ( $MoS_2$ ,  $WS_2$ ,  $(C_2F_4)_n$ , BN,  $CaF_2$ ,  $BaF_2$ , поляризованный графит) связующие вещества (модифицированная эпоксидная, стирольная, полиамид–имидная, акриловая и фенолформальдегидная смолы, полиуретан) растворители и функциональные добавки.

Композиционный слой на основе покрытия *MODENGY* – это прочно сцепленная с основой матрица связующего вещества, в ячейках которой размещены высокодисперсные частицы твердого смазочного материала. Благодаря наносимому покрытию осуществляется заполнение впадин микронеровностей поверхности, увеличивается ее опорная площадь и несущая способность. Само покрытие обладает высоким сопротивлением к сжатию и малым сопротивлением к сдвигу – коэффициент сухого трения принимает значение в несколько сотых при контактных давлениях, соизмеримых с пределом текучести материала основы.

Среди преимуществ применения АТСП *MODENGY* можно выделить следующие: незначительный коэффициент трения (от 0,03), широкий диапазон рабочих температур (от  $-210$  до  $+560$  °С), защита от коррозионного воздействия на срок до 1000 ч, небольшая толщина слоя ( $25 \pm 5$  мкм), высокие противозадирные свойства и несущая способность до 2500 МПа, отсутствие необходимости механической обработки [3].

Применение данной технологии позволяет выполнять функцию динамического уплотнения, эффективного предотвращения схватывания и задиры, снижать трение и шум, надежно защищая металлические поверхности от коррозионного воздействия.

#### Библиографический список

1. ГОСТ Р 53691–2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Паспорт отхода I–IV класса опасности. Основные требования ; введ. с 15.12.2009. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200081173> (дата обращения: 29.03.2020).
2. Бобрович Б. Б. Процессы и аппараты переработки промышленных отходов / Б. Б. Бобрович. – Москва : МГТУ «МАМИ», 2018. – 110 с.
3. Сидорова К. В. Перспективы реновации технологических машин для переработки твердых бытовых отходов / К. В. Сидорова, А. Я. Данилюк, П. Г. Пыриков // Фундаментальные и прикладные научные исследования: инновационный потенциал развития. – 2019. – Ч. 1. – С. 74–78.
4. Шубов Л. Я. Технология твердых бытовых отходов / Л. Я. Шубов. – Москва : ИНФРА–М, 2016. – 400 с.



## РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЛИ НОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО?

Слепынина Татьяна Николаевна,

E-Mail: [stn1522@yandex.ru](mailto:stn1522@yandex.ru),

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос эффективности реконструкции и нового строительства на примерах промышленных, жилых и общественных зданий города Нижний Тагил, какие здания рационально подвергать реконструкции, а какие проще снести и на их месте построить новые. Реконструкция может проводиться с целью изменения функционального назначения зданий, с целью увеличения полезных объемов и площадей, с целью проведения технического перевооружения и сохранения внешнего облика зданий и существующей застройки. Произведен анализ методов реконструкции общежития, детского дошкольного учреждения, драматического театра и цирка. Описаны методы производства работ при реконструкции жилых и общественных зданий и методы усиления и восстановления несущей способности конструкций. За счет проведенной реконструкции здание общежития переведено в жилое с комфортными условиями проживания, в детском дошкольном учреждении увеличено количество мест, а драматический театр и цирк подверглись техническому перевооружению, изменили свои интерьеры и фасады и, благодаря этому, стали настоящим украшением центральной части города.

**Ключевые слова.** Реконструкция, техническое перевооружение, расширение, демонтаж, работоспособное состояние, пристрой, восстановление несущей способности, усиление конструкций, высолы.

Что выгоднее реконструкция или новое строительство? Такой вопрос часто задают себе заказчики, архитекторы и строители. Однозначно ответить на данный вопрос сложно, все зависит от назначения объекта, конечных целей, конкретного места и условий строительства.

К новому строительству относится создание зданий, строений сооружений (в т. ч. на месте сносимых объектов капитального строительства) [4]. Реконструкция объектов капитального строительства – изменение параметров объекта капитального строительства, его частей (высоты, количества этажей, площади, объема), в т. ч. надстройка, перестройка, расширение объекта капитального строительства, а также замена и (или) восстановление несущих строительных конструкций объекта капитального строительства, за исключением замены отдельных элементов таких конструкций на аналогичные или иные улучшающие показатели таких конструкций элементы и (или) восстановление указанных элементов [4].

Что касается промышленных объектов, то здесь преимущество реконструкции бесспорно, т. к. она предусматривает возведение пристроев или изменение внутренней планировки с целью увеличения мощности цехов и предприятий в целом. Поэтому капиталовложения в реконструкцию будут меньше, чем в новое строительство. Кроме этого окупаемость объекта наступит значительно быстрее, чем при новом строительстве.

Интересен вопрос эффективности, когда речь идет о жилых и общественных зданиях. Остановимся на жилье. Жилой фонд Нижнего Тагила создавался в послевоенный период, начиная с конца 40-х до середины 80-х годов прошлого века, когда осуществлялось бурное жилищное строительство. На текущий момент большинству домов более 50–60 лет, многие из них уже не соответствуют требованиям по теплоизоляции и уровню комфортности. Следовательно, возникает вопрос, что с ними делать? В Москве приняли решение о сносе пятиэтажных домов построенных в этот период и строительстве на их месте новых современных зданий различного назначения. Для Нижнего Тагила это неприемлемо, т. к. необходим большой резервный фонд для временного проживания людей. Поэтому у нас в городе пошли по другому пути. До

недавнего времени в городе было много общежитий, которые становятся в последнее время невостребованными. Часть из них решили реконструировать и изменить их функциональное назначение. Так, бывшее общежитие по проспекту Мира 52 реконструировали и перевели в разряд жилых зданий. В процессе реконструкции были усилены существующие фундаменты, произведено утепление наружного стенового ограждения, деревянные перекрытия, которые частично разрушились и утратили несущую способность были демонтированы и заменены на монолитные. Старая скатная кровля из асбестоцементных листов была заменена на кровлю из металлочерепицы. Кроме этого была выполнена перепланировка всего внутреннего пространства, за счет чего общежитие из коридорного типа превратилось в 2-х подъездный жилой дом [1]. На первом этаже были размещены помещения различного назначения – сбербанк, аптека, магазины, мастерские, тем самым создав комфортные условия для жителей не только данного дома, но и микрорайона в целом.

Если рассматривать общественные здания, то есть необходимость остановиться на дошкольных детских учреждениях. Девяностые годы прошлого века характеризуют снижением рождаемости, поэтому потребность в детских садах уменьшилась и их стали переводить в здания другого назначения. Но с 2010 г. наблюдается рост рождаемости, имеющиеся детсады уже не могли обеспечить всех желающих, возникли очереди на несколько лет вперед. Особенно острой эта проблема стала для центральных районов города, площадей под новое строительство оказалось крайне мало и принимается решение о реконструкции существующих детских садов.

Одним из примеров реконструкции с увеличением полезных объемов здания является реконструкция здания детского сада по ул. Карла Маркса 59, проходившей с 2012 по 2014 гг. Существующее здание детского сада – двухэтажное с техническим подпольем и техническим чердаком. Данное здание относится к застройке 60-х гг., и было построено в 1965 г. Здание в плане прямоугольной формы. Проектом реконструкции были предусмотрены следующие объемно-планировочные решения: надстройка третьего этажа и устройство трех пристроев. Данные мероприятия соблюдают предельные параметры разрешенного строительства и увеличивают площадь здания без увеличения площади земельного участка [1].

Для осуществления реконструкции требовалось произвести демонтаж ряда конструкций: стропильной крыши, кирпичных карнизов, элементов наружных веранд, крылец и входов здания, дверных и оконных заполнений, перегородок, покрытия полов, плит чердачного перекрытия в местах устройства лестничных клеток.

Чтобы уменьшить нагрузки на фундамент, конструктивная схема надстраиваемой части была принята каркасная с неполным стальным каркасом. Колонны выполнены из стальных широкополочных двутавров 20Ш1 сплошного сечения. Шаг колонн переменный. Высота до низа несущих конструкций покрытия 3,0 м. Портальные и крестовые связи по колоннам выполнены из равнополочных уголков. Несущими конструкциями покрытия являются стальные балки сплошного сечения из широкополочных двутавров. Настил покрытия – профилированные листы укладываются по стальным прогонам из швеллеров. Запроектирован монолитный железобетонный пояс размерами 600×400 из бетона класса В20 и арматуры А400. Пристрой в осях 5–10 также выполнен по конструктивной схеме с неполным стальным каркасом, а пристрой в осях 1–3, 12–14 выполнены по бескаркасной системе с высотой этажа 3,3 м. Стены выполнены из кирпича на цементном растворе марки М50. Толщина стен 380 мм. Косоуры лестничных маршей и балок площадок выполнены из прокатных швеллеров 30У. Жесткость пристроев обеспечивается совместной работой продольных и поперечных кирпичных стен, жесткими дисками перекрытия и покрытия, рамными узлами сопряжения балок перекрытия и покрытия с колоннами, жесткой заделкой в фундаменты. Под колонны пристроя в осях 5–10 выполняются столбчатые монолитные железобетонные фундаменты из бетона В15 со ступенчатой плитной частью и подколонником.

Для утепления существующих наружных стен здания, а также для утепления пристроев используется утеплитель «URSAGEОП» – из минераловатных плит, и «URSAGEО ФАСАД» из плит штапельного стекловолокна с ветрозащитным покрытием. Цокольная часть здания, подвальные помещения утепляется слоем пеноплекса 35. Наружные стены надстраиваемого этажа – трехслойные стеновые панели типа «сэндвич» толщиной 200 мм. Для оформления фасадов используются профилированный настил и стеновые панели типа «сэндвич».

Таким образом, после проведенной реконструкции здание приобрело современный внешний облик, а количество мест в детском саду было увеличено до 280 [1].

Если говорить о реконструкции зрелищных зданий, то наибольший интерес представляют здание драматического театра им. Мамина-Сибиряка и здание Нижнетагильского цирка. Оба здания являются достопримечательностями Нижнего Тагила, поэтому о сносе их вопрос не ставился. Было принято решение о реконструкции с установкой современного оборудования и усовершенствованием внутреннего пространства.

Здание драматического театра было построено в 1955 г. и является ярким представителем классицизма прошлого века. Оно имеет прямоугольную форму в плане внутреннее пространство разделено на четыре этажа и подвал. Здание драматического театра уже подвергалось реконструкции в 1992 г., а в 2007 г. был выполнен капитальный ремонт кровли и санузлов.

В результате обследования, проведенного в 2013 г., было установлено следующее. Текущее состояние здания в целом было оценено как работоспособное. Физический износ фундаментов составлял 11–20 %, что говорило об их исправном состоянии. Были обнаружены такие дефекты наружных стен как высолы, следы увлажнения, смещение гранитных плит отделки цоколя, отслоение и отпадение штукатурки, отдельные сколы и выбоины. Внутренние стены здания также имели работоспособное состояние, однако были выявлено массовое отпадение штукатурки стен подвала. Снижение несущей способности колонн обнаружено не было. Чердачное перекрытие имело ограниченно-работоспособное состояние. Наблюдались высолы, следы протечек, повреждение штукатурного слоя в местах протечек.

Несмотря на капитальный ремонт, произведенный в 2007 г., было установлено недопустимое техническое состояние кровли. Дефекты кровли: пробоины и просветы, повреждены места примыкания кровли к вертикальным конструкциям, сколы, выбоины трещины в штукатурном слое элементов балюстрады, планки снегодержателей местами повреждены или отсутствуют. Также было отмечено предаварийное состояние деревянных дверных блоков и недопустимое состояние пандусов, крылец служебного входа и полов. В целом физический износ несущих конструкций не превышал 30–40 %. Однако было отмечено общее снижение эксплуатационных показателей здания [1].

В процессе реконструкции был выполнен большой спектр демонтажных работ: демонтаж опорных металлических стоек, покрытий деревянных полов, брусьев каркаса деревянного настила, демонтаж конструкции выносного моста из одиночных и гнутосваренных профилей, деревянных настилов колосников, ограждения шахт; стен из кирпича, бетонных фундаментов и перекрытий в трюме сцены, элементов галерей.

Большой объем работ был выполнен по усилению конструкций: установлены подкосы под существующие консоли, усилены штанкетные балки путем устройства дополнительной балки с установкой нового настила колосников, усилены фермы приваркой дополнительных подкосов, выполнен монтаж металлических тяжей для подвеса цепных лебедок, усилены опоры выносного круга с помощью металлических обойм. В трюме сцены выполнили новый бетонный пол толщиной 30 мм армированный сеткой Ø5Вр500 50×50 с железнением.

Были выполнены большие объемы работ по отделке внутренних и наружных стен. Штукатурный слой стен был отремонтирован, также восстановлены карнизы, отделка цоколя и отмостка по периметру здания. Штукатурное основание пилястр и откосов укрепили силикатной грунтовкой, затем нанесли накрывочный слой из цементной мелкозернистой штукатурки. Штукатурный слой стен был заменен на цементно-известковую штукатурку. Для ремонта окрасочных покрытий стен, колонн, пилястр, карнизов использовали отделочные материалы фирмы «Рунит»: силикатные грунтовки, шпатлевки, силикатные краски. Бетонные декоративные элементы фасада отремонтировали с применением быстротвердеющих растворов с дальнейшим покрытием поверхности акриловой краской.

На чердаке произвели замену пароизоляционного слоя и утеплителя. Для стропильной крыши произвели замену мауэрлата, конструкций вентшахт, венткоробов, венткамер.

Реконструкция драматического театра проводилась с августа 2014 по август 2015 г. В результате проведения реконструкции был не только восстановлен внешний вид здания, но также проведено техническое перевооружение [1].

Начиная с 1975 г., эксплуатируется здание Филиала федерального казенного предприятия «Российской Государственной цирковой компании» «Нижнетагильский государственный цирк», до недавнего времени оно продолжало выполнять свою функцию. Конечно, за такой продолжительный период времени здание утратило свой внешний облик, инженерные сети и коммуникации пришли в негодность, а что касается сердца цирка – купол, возвышающийся над ареной и зрительным залом, нуждался в усилении [2].

Первым шагом для восстановления железобетонного купола стало обследование здания в апреле 2013 г. В результате обследования кровли купола над манежем обнаружены дефекты, через которые протекают атмосферные осадки на конструкции внутри здания:

- замки соединений в виде вертикальных гребней металлических кровельных листов в виде вертикальных гребней разгерметизировались, разжались, обнаружены просветы между листами, поверхность листов содержала микротрещины, по фасаду центрального купола отслоилось штукатурное покрытие;

- вдоль парапета по всей ендове обнаружено разрушение целостности мягкого кровельного покрытия: вздутия, трещины, отслоения слоев от вертикальной стены парапета;

- внутренний организованный водосток не обеспечивал отвод воды, т. к. не был соблюден уклон кровельной поверхности вокруг воронок [2].

Заключение обследования выявило, что здание цирка за 38 лет эксплуатации получило существенный физический износ и повреждения различного характера. Учитывая ограниченно-работоспособное и аварийное техническое состояние отделочных покрытий несущих и ограждающих конструкций, необходимо было провести ремонтно-восстановительные мероприятия по разработанному проекту специализированной проектной организацией на восстановительные работы на основании заключения о техническом состоянии отделочного покрытия несущих и ограждающих конструкций [2].

Железобетонные плиты купола были исследованы на наличие трещин, подлежащих инъектированию, было выполнено усиление наружной части железобетонного купола системой внешнего армирования *Sika* (Швейцария) из углеродного волокна, а также усиление ребер и полок плит купола. Холсты *SikaWrap* использовались, т. к. их целесообразно применять, прежде всего, для усиления плит перекрытий и покрытий, работающих на изгиб, срез, а также в условиях плоского напряженного состояния. Незаменимы данные холсты для усиления поверхностей с криволинейными очертаниями или большой площади. Благодаря усилению железобетонного купола, сейчас он способен выдержать аппаратуру массой до 30 т. После реконструкции Нижнетагильский цирк стал

новым и современным, где практически все создано по индивидуальным проектам, от освещения до кресел в зрительном зале. Можно со смелостью утверждать, что Нижнетагильский цирк по уровню оснащения стал в один ряд с ведущими манежами России, а по ряду критериев даже превосходит их [3].

#### **Вывод**

На эффективность и целесообразность реконструкции и нового строительства оказывают влияние множество факторов, поэтому при рассмотрении этого вопроса необходимо учитывать все аспекты и принимать наиболее разумные решения.

#### **Библиографический список**

1. Проектная документация МУП «Тагилгражданпроект», 31.574.7523-ПЗ. Разделы 1,3,4. Пояснительная записка. – Нижний Тагил : МУП «Тагилгражданпроект» 2013. – 40 с.
2. История цирка // Нижнетагильский Государственный Цирк – официальный сайт. URL: <https://circus-ntagil.ru/istorija-tsirka.html> (дата обращения: 11.04.2020).
3. Для Тагила это очень круто. Нижнетагильский цирк открыли после ремонта // Новости Нижнего Тагила и Свердловской области – Агентство новостей «Между строк» . URL: <https://mstrok.ru/news/dlya-tagila-eto-ochen-kruto.-nizhnetagilskij-cirk-otkryli-posle-remonta.html> (дата обращения: 11.04.2020).
4. Градостроительный кодекс РФ, введен в действие с 29 декабря 2004 г.

### **ВЛИЯНИЕ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ИНДЕНТОРОМ ИЗ DBN НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА NiCrBSi-Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> ПОКРЫТИЯ**

**Соболева Наталья Николаевна,**

E-Mail: [natashasoboleva@list.ru](mailto:natashasoboleva@list.ru),

Уральский федеральный университет,

Институт машиноведения Уральского отделения РАН,

**Макаров Алексей Викторович,**

E-Mail: [av-mak@yandex.ru](mailto:av-mak@yandex.ru),

**Николаева Екатерина Павловна,**

E-Mail: [e.kat.n@mail.ru](mailto:e.kat.n@mail.ru),

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН,

**Скорынина Полина Андреевна,**

E-Mail: [polina.skorynina@mail.ru](mailto:polina.skorynina@mail.ru),

**Малыгина Ирина Юрьевна,**

E-Mail: [malygina@imach.uran.ru](mailto:malygina@imach.uran.ru),

Институт машиноведения Уральского отделения РАН,

г. Екатеринбург

**Аннотация.** Покрытия на основе NiCrBSi сплавов с карбидами хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> относятся к металломатричным композиционным материалам (покрытиям) и отличаются эффективной способностью сопротивляться износу, коррозии и окислению при высоких температурах. Перспективным методом получения покрытий является лазерная наплавка. Фрикционная обработка покрытия скользящими инденторами в качестве финишной обработки способствует созданию поверхности с низкой шероховатостью, благоприятными сжимающими напряжениями, а также повышенной износостойкостью. Метод инструментированного микроиндентирования, в процессе которого осуществляется запись диаграмм нагружения и разгружения индентора, используется для

оценки механических свойств хромоникелевых покрытий. В работе изучены характеристики, определяемые при инструментированном микроиндентировании поверхности наплавленного лазером покрытия NiCrBSi–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, подвергнутого фрикционной обработке скользящим индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе при нагрузках на индентор 350, 500 и 700 Н, и после шлифовки. Показано, что фрикционная обработка во всем рассматриваемом диапазоне нагрузок способствует повышению прочностных характеристик, а также показателей, указывающих на повышенную способность поверхности покрытия сопротивляться упругому и пластическому деформированию. Наибольший рост отмеченных показателей наблюдается после фрикционной обработки поверхности NiCrBSi–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> покрытия при нагрузке 700 Н.

**Ключевые слова.** NiCrBSi–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> покрытие, лазерная наплавка, фрикционная обработка, микромеханические свойства, инструментированное микроиндентирование.

### Введение

Создание металлматричных композиционных покрытий является современным способом повышения эксплуатационных характеристик покрытий. Сплавы NiCrBSi широко используются в качестве материала матрицы композиционных покрытий благодаря их высокой стойкости к различным видам изнашивания и воздействию коррозии. В указанных сплавах проведением высокотемпературного отжига может быть сформирована исключительно термостойкая (до 1000 °С) «каркасоподобная» структура из крупных боридов и карбидов хрома [1–3]. Это существенно расширяет возможности использования лазерных покрытий на хромоникелевой основе для высокотемпературных применений, в частности, в металлургии [4]. Кроме того, рассматриваемые сплавы имеют относительно низкую точку плавления и могут выполнять функцию пластичной связки для упрочняющих фаз. Покрытия на основе NiCrBSi с использованием в качестве упрочняющих частиц карбида хрома Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> способны эффективно сопротивляться износу, коррозии и окислению при высоких температурах [5].

Одним из перспективных методов получения покрытий является газопорошковая лазерная наплавка. По сравнению с другими методами нанесения поверхностных слоев, лазерная наплавка формирует покрытия с повышенной твердостью и однородностью, а также с отличным металлургическим сцеплением с подложкой [6].

Наплавленные лазером покрытия имеют значительную шероховатость и волнистость, поэтому их поверхность зачастую подвергается шлифованию абразивными кругами. Однако шлифование имеет ряд недостатков. Использование поверхностного деформирования скользящими инденторами в качестве финишной обработки является современным способом создания высокого качества поверхности, благоприятных сжимающих напряжений в поверхностном слое, а также повышения прочности и износостойкости поверхности деталей [7]. Предложен эффективный способ получения упрочненного NiCrBSi покрытия на металлических деталях, включающий газопорошковую лазерную наплавку и фрикционную обработку полусферическим индентором из кубического нитрида бора [8]. Авторами было показано также, что фрикционная обработка скользящим индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора DBN при нагрузках на индентор 350–700 Н повышает микротвердость наплавленного лазером покрытия NiCrBSi–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> [9].

Одним из методов оценки механических свойств хромоникелевых покрытий является инструментированное микроиндентирование [10], осуществляющее запись диаграмм в процессе нагружения и разгружения индентора. Метод позволяет оценить механические свойства материалов, для которых нет возможности провести стандартные испытания на растяжение, сжатие и изгиб [11].

Однако для оценки микромеханических характеристик покрытия NiCrBSi–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, сформированного лазерной наплавкой и подвергнутого фрикционной обработке, метод инструментированного микроиндентирования ранее не применялся. Поэтому целью данной работы явилось исследование влияния фрикционной обработки индентором из DBN при нагрузках 350–700 Н на микромеханические свойства NiCrBSi–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> покрытия, полученного лазерной наплавкой.

#### **Материал и методика**

Материалом для наплавки являлась смесь двух порошков: 85 масс. % системы NiCrBSi марки ПГ-CP2 гранулометрического состава 40–160 мкм и 15 % Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> дисперсностью 50–150 мкм. Химический состав NiCrBSi порошка, масс. %: 0,48 С; 14,8 Cr; 2,6 Fe; 2,9 Si; 2,1 В; остальное – Ni. Двухслойная наплавка покрытий осуществлялась на пластины из низкоуглеродистой стали (0,2 % С) с помощью CO<sub>2</sub>-лазера непрерывного действия.

Фрикционную обработку осуществляли на плоских наплавленных образцах с полированной поверхностью при возвратно-поступательном движении полусферического индентора из мелкодисперсного кубического нитрида бора DBN. Нагрузка на индентор составляла 350, 500 и 700 Н. Фрикционную обработку проводили на воздухе при пятикратном сканировании поверхности индентором со средней скоростью 0,013 м/с, длине хода 17 мм, смещении индентора 0,1 мм на двойной ход.

Инструментированное микроиндентирование с записью диаграммы нагружения и разгрузки проводилось на измерительной системе *Fischerscope* HM2000 XYm с помощью индентора Виккерса и программного обеспечения *WIN-HCU* при максимальной нагрузке на индентор 0,245 Н. Расчет микромеханических параметров осуществлялся согласно стандарту *ISO 14577* [12]. Время нагрузки/разгрузки – 5 с. Время выдержки при максимальной нагрузке – 20 с.

#### **Результаты и обсуждение**

Используя кривые нагружения и кривые разгрузки индентора, по методу Оливера и Фарра [13] определялись характеристики, которые отражают особенности механического поведения рассматриваемых покрытий при упругопластическом деформировании.

Установлено, что фрикционная обработка поверхности покрытия NiCrBSi–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> снижает значения максимальной  $h_{\max}$  (до 1,14–1,18 мкм) и остаточной  $h_p$  (до 0,78–0,83 мкм) глубин вдавливания индентора по сравнению со значениями для шлифованной поверхности ( $h_{\max} = 1,26$  и  $h_p = 0,93$  мкм). Наименьшие значения максимальной и остаточной глубины вдавливания при индентировании характерны для поверхности покрытия, подвергнутого фрикционной обработке с нагрузкой на индентор 700 Н.

Фрикционная обработка индентором из DBN при всех использованных нагрузках повышает также значения твердости по шкале Мартенса *HM*, учитывающей как пластическую, так и упругую деформацию, по сравнению со шлифованным состоянием, причем обработка при нагрузках 350–500 Н повышает значения *HM* на 15 %, а при нагрузке 700 Н – на 25 %. Еще более существенно увеличиваются после фрикционной обработки значения твердости индентирования при максимальной нагрузке  $H_{IT}$  – на 20–21 % после обработки при нагрузках 350–500 Н и на 32 % после обработки при нагрузке 700 Н. Увеличение  $H_{IT}$  свидетельствует о повышении сопротивления постоянной деформации [12].

Модуль упругости при индентировании поверхности покрытия  $E^*$  после фрикционной обработки с разными нагрузками мало отличается (в пределах погрешности) от характеристики шлифованной поверхности. Известно, что модуль упругости металлических материалов может изменяться при деформации [14–15], однако в данном случае поверхность в шлифованном состоянии тоже может рассматриваться как деформированная. Важно также отметить, что после фрикционной обработки индентором из DBN на воздухе с нагрузкой 350 Н у композиционного покрытия NiCrBSi–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>

отмечается на 13 % более высокий уровень контактного модуля упругости ( $E^* = 228 \pm 6$  ГПа), чем у покрытия NiCrBSi аналогичного состава, но без добавок  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  ( $E^* = 202 \pm 5$  ГПа) [16]. Кроме того, контактный модуль упругости покрытия ПГ-СР2 без фрикционной обработки составлял  $195 \pm 5$  ГПа [17]. Это можно объяснить наличием в композиционном покрытии 15 % карбида  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  с существенно повышенным модулем упругости ( $E^* = 370$  ГПа) [18]. Подобным образом в работе [19] наблюдали рост модуля упругости композиционного материала с увеличением количества фазы с большим модулем упругости.

Значения общей механической работы вдавливания  $W_t$ , состоящей из работы пластической деформации и работы упругого восстановления, имеют обратную зависимость от вида обработки по сравнению со значениями твердостей  $H_M$  и  $H_{IT}$ , поскольку чем более упрочнен материал, тем меньше он деформируется под индентором и, соответственно, тем меньшая работа затрачивается на такое деформирование. Работа упругой деформации при индентировании  $W_e$ , освобождаемая при снятии приложенной нагрузки, увеличивается при возрастании нагрузки на индентор при проведении фрикционной обработки.

Установленные значения работ (общей механической работы вдавливания  $W_t$  и работы упругой деформации  $W_e$ ) были использованы при расчете по формуле  $(1 - (W_e/W_t)) \cdot 100$  % пластической составляющей работы при индентировании поверхности покрытия. Из всех рассмотренных состояний покрытия наибольшей пластической составляющей работы, совершенной при индентировании (72 %), обладает покрытие в шлифованном состоянии. Увеличение нагрузки на индентор при проведении фрикционной обработки последовательно снижает пластическую составляющую от 66 % при нагрузке 350 Н до 63 % при нагрузке 700 Н.

Величина упругого восстановления  $R = ((h_{\max} - h_p)/h_{\max}) \cdot 100$  % [20] и отношение  $H_{IT}/E^*$  (удельная контактная твердость) [23] увеличиваются при проведении фрикционной обработки при нагрузке на индентор 350 Н–500 Н и еще более значительно при нагрузке на индентор 700 Н по сравнению со шлифованным состоянием. Принято считать [20], что упругое восстановление  $R$  и отношение  $H_{IT}/E^*$  характеризуют долю упругой деформации в общей деформации при индентировании. Отношение  $H_{IT}^3/E^{*2}$  имеет минимальные значения для покрытия в шлифованном состоянии. Фрикционная обработка даже при минимальной нагрузке 350 Н способствует росту этого показателя на 82 %. Обработка же при нагрузке 700 Н повышает указанный показатель на 145 %. Значения отношения  $H_{IT}^3/E^{*2}$  считаются характеристикой сопротивления материала пластической деформации после начала течения, поскольку указанное степенное отношение пропорционально напряжению течения  $P_y$  материала [21].

Ранее было показано [22], что в структуре покрытия NiCrBSi- $\text{Cr}_3\text{C}_2$  после наплавки присутствуют крупные (50–100 мкм) исходные карбиды хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ . Фрикционная обработка индентором из DBN при нагрузке 350 Н пластически деформирует (выглаживает) NiCrBSi матрицу, при этом на обработанной поверхности наблюдаются выступающие исходные карбиды хрома  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ . Образующийся на поверхности изнашивания выступающий износостойкий каркас из упрочняющих фаз играет преобладающую роль (по сравнению с ролью металлической матрицы) в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой [23], поэтому можно ожидать, что покрытие после фрикционной обработки при нагрузке 350 Н будет характеризоваться высоким сопротивлением абразивному износу [9].

В процессе фрикционной обработки покрытия NiCrBSi- $\text{Cr}_3\text{C}_2$  при нагрузке 700 Н происходит частичное удаление с поверхности крупных исходных карбидов хрома [9]. Микромеханические свойства, определенные при инструментированном микроиндентировании, показывают, что повышение нагрузки при фрикционной обработке до 700 Н (по сравнению с обработкой при 350–500 Н) повышает твердость покрытия и его способность сопротивляться пластической деформации. Это



свидетельствует о том, что уровень упрочнения металлической матрицы в рассматриваемом случае вносит большой вклад в общие прочностные свойства покрытия, измеренные при микроиндентировании, чем возможное их снижение в связи с меньшим количеством крупных карбидов хрома после фрикционной обработки при нагрузке 700 Н.

Таким образом, по сравнению с покрытием в шлифованном состоянии, покрытие после фрикционной обработки характеризуется и максимальным деформированием в упругой области (т. е. замедленным переходом к пластической стадии деформации), и повышенной способностью противостоять контактными нагрузкам после начала пластического течения. В большей степени указанные особенности проявляются для покрытия после фрикционной обработки при наибольшей использованной нагрузке. В работе [24] результаты микроиндентирования стальных поверхностей после фрикционной обработки были соотнесены с механизмами изнашивания при трении скольжения. Повышенная способность сопротивляться упругопластическому деформированию может свидетельствовать о лучшем сопротивлении изнашиванию в условиях трения скольжения покрытия после фрикционной обработки при нагрузке 700 Н.

### Заключение

По данным инструментированного микроиндентирования, фрикционная обработка поверхности композиционного покрытия NiCrBSi–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> индентором из мелкодисперсного кубического нитрида бора на воздухе при нагрузках 350–700 Н вызывает значительное повышение прочностных характеристик (твердости по Мартенсу  $H_M$  и твердости вдавливания при максимальной нагрузке  $H_{IT}$ ) и не влияет на уровень контактного модуля упругости  $E^*$  покрытия по сравнению со шлифовкой. Добавка 15 масс. % карбида Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> с большим модулем упругости приводит к росту на 13 % величины контактного модуля упругости подвергнутого фрикционной обработке покрытия.

В результате фрикционной обработки при всех исследуемых режимах понижается пластическая составляющая работы по индентированию и возрастают величины упругого восстановления  $R$ , а также отношений  $H_{IT}/E^*$  и  $H_{IT}^3/E^{*2}$  (по сравнению с соответствующими характеристиками для шлифованного состояния), что указывает на замедленный переход при контактном нагружении покрытия к пластическому деформированию с последующим более значительным сопротивлением развитию пластического течения.

Фрикционная обработка при максимальной используемой нагрузке на индентор (700 Н), приводящая к частичному удалению с поверхности крупных исходных карбидов хрома, но повышающая твердость металлической матрицы, обеспечивает максимальный рост средних значений прочностных характеристик, измеренных при микроиндентировании, а также показателей, указывающих на повышенную способность поверхности покрытия после рассматриваемой обработки сопротивляться упругому и пластическому деформированию.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ МК-391.2019.8 и в рамках государственных заданий ИМАШ УрО РАН по теме № АААА-А18-118020790147-4 и ИФМ УрО РАН по темам № АААА-А18-118020190116-6 и «Лазер». Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.*

### Библиографический список

1. Патент РФ № 2492980. Способ получения теплостойкого покрытия / А. В. Макаров, Н. Н. Соболева, И. Ю. Малыгина, А. Л. Осинцева. – Опубл. в БИМП. – 2013. – № 26. – 6 с.
2. Макаров А. В. Формирование износостойкого хромоникелевого покрытия с особо высоким уровнем теплостойкости комбинированной лазерно-термической

- обработкой / А. В. Макаров, Н. Н. Соболева, И. Ю. Малыгина, А. Л. Осинцева // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2015. – № 3. – С. 39–46.
3. Makarov A. V., Soboleva N. N., Malygina I. Yu., Kharanzhevskiy E. V. Improving the properties of a rapidly crystallized NiCrBSi laser clad coating by high-temperature processing // *Journal of Crystal Growth*. – 2019. – Vol. 525. – P. 125200-1 – 125200-5.
4. Makarov A. V., Korobov Yu. S., Soboleva N. N. et al. Wear-resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications // *Letters on Materials*. – 2019. – No. 4. – P. 470–474.
5. Rojacz H., Zikin A., Mozelt C. et al. High temperature corrosion studies of cermet particle reinforced NiCrBSi hardfacings // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – Vol. 222. – P. 90–96.
6. Li C., Zhang Q., Wang F. et al. Microstructure and wear behaviors of WC-Ni coatings fabricated by laser cladding under high frequency micro-vibration // *Applied Surface Science* – 2019. – Vol. 485. – P. 513–519.
7. Макаров А. В. *Металлофизические основы наноструктурирующей фрикционной обработки сталей* / А. В. Макаров, Л. Г. Коршунов // *Физика металлов и металловедение*. – 2019. – Т. 120. – № 3. – С. 327–326.
8. Патент РФ № 2709550. Способ получения упрочненного никельхромборкремниевого покрытия на металлических деталях / Н. Н. Соболева, А. В. Макаров, И. Ю. Малыгина. – Оpubл. в БИМП. – 2019. – № 35. – 10 с.
9. Soboleva N. N., Makarov A. V., Skorynina P. A. et al. The effect of load during frictional treatment with a DBN indenter on the surface finish of the NiCrBSi–Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> laser clad coating // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2176. – 020345. – 5 p.
10. Xuan H.-F., Wang Q.-Y., Bai S.-L., et al. A study on microstructure and flame erosion mechanism of a graded Ni–Cr–B–Si coating prepared by laser cladding // *Surface and Coatings Technology*. – 2014. – Vol. 244. – P. 203–209.
11. Смирнов С. В. Оценка влияния наполнителей на механические свойства эпоксидного клеевого покрытия, определенные методом инструментального микроиндентирования / С. В. Смирнов, И. А. Веретенникова, Е. О. Смирнова, А. В. Пестов // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2017. – №. 6. – С. 103–111.
12. ISO 14577–1:2002. Metallic materials Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. – Test method: part 1. – 2002.
13. Oliver W.C., Pharr J.M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments // *Journal of Materials Research*. – 1992. – Vol. 7. – Is. 6. – P. 1564–1583.
14. Макаров А. В. Структурные особенности поведения высокоуглеродистой перлитной стали при циклическом нагружении / А. В. Макаров, Р. А. Саврай, В. М. Счастливец // *Физика металлов и металловедение*. – 2011. – Т. 111. – № 1. – С. 97–111.
15. Savrai R. A., Makarov A. V., Malygina I. Yu. et al. Improving the Strength of the AISI 321 Austenitic Stainless Steel by Frictional Treatment // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2017. – Is. 5. – P. 43–62.
16. Соболева Н. Н. Влияние фрикционной обработки на микромеханические свойства NiCrBSi покрытия, полученного лазерной наплавкой / Н. Н. Соболева, А. В. Макаров, И. Ю. Малыгина // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. – 2017. – № (4) 42. – С. 135–140.
17. Алексеев А. Г. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: справочник / А. Г. Алексеев, Г. А. Бовкун, А. С. Болгар, А. Л. Борисова ; под ред. Т. Я. Косолаповой. – Москва : *Металлургия*, 1986. – 928 с.
18. Пугачева Н. Б. Структура и теплофизические свойства алюмоматричных композитов / Н. Б. Пугачева, Н. С. Мичуров, Е. И. Сенаева, Т. М. Быкова // *Физика металлов и металловедение*. – 2016. – Т. 117. – № 11. – С. 1188–1195.

19. Петржик М. И. Износостойкость и механические свойства сплавов медицинского назначения / М. И. Петржик, М. Р. Филонов, К. А. Печёркин // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2005. – № 6. – С. 62–69.

20. Макаров А. В. Роль упрочняющих фаз в сопротивлении абразивному изнашиванию NiCrBSi покрытий, сформированных лазерной наплавкой / А. В. Макаров, Н. Н. Соболева, И. Ю. Малыгина // Трение и износ. – 2017. – Т. 38. – № 4. – С. 311–318.

21. Макаров А. В. Повышение трибологических свойств аустенитной стали 12X18H10T наноструктурирующей фрикционной обработкой / А. В. Макаров, П. А. Скорынина, А. Л. Осинцева // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2015. – № 4 (69). – С. 80–92.

## МЕТАЛЛИЗАЦИЯ ООЛИТОВОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ ПОСЛЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ОБЖИГА

Сулеймен Бакыт Темиргалиулы,

E-Mail: bakytsuleimen@mail.ru,

Салихов Семен Павлович,

E-Mail: salikhovsp@susu.ru,

Южно-Уральский Государственный Университет  
(Национальный исследовательский университет)

**Аннотация.** Проведены исследования процесса обжига и металлизации бурожелезняковых руд Аятского месторождения. Для удаления из руды углекислоты карбонатов, гидратной влаги, серы и превращения гетита в гематит проведен окислительный обжиг в муфельной печи фирмы «Nabertherm» при температуре 900 °С в течение 10 мин. Представлены результаты восстановительного обжига в атмосфере СО при температурах 800, 900, 1000, 1050 °С в течение 3-х ч. Микрорентгеноспектральным методом на электронном микроскопе исследован химический состав участков исходной и обожженной руды, также магнитных и не магнитных частей восстановленного образца. Установлено, что при температуре 800 °С железо и фосфор не восстанавливаются. При температуре 1050 °С, получен материал с низким содержанием фосфора (0,1 ат. %) в железе.

**Ключевые слова.** Аятское месторождение, оолитовая железная руда, селективное восстановление, восстановление фосфора, температура восстановления.

### Введение

Геолого-технологическое исследование керченских и бакчарских (Россия) [1–3], лисаковских и аятских (Казахстан) [4–6], бурых железняков показали, что эти руды при содержании железа 25–45 % Fe имеют в своем составе большие количества жильных минералов, фосфора, щелочных элементов и традиционные методы обогащения не могут эффективно удалить фосфор из руды [7–11]. К этому же типу относятся такие известные объекты, как вабановские толщи в Ньюфаундленде (Канада), силурийская Клинтонская группа Центральных и Южных Аппалачей (США), Лотарингский бассейн (Франция, Германия, Бельгия и Люксембург), и др. [12–21]. Таким образом, разработка технологии использования такого типа руды имеет большое значение.

### Цель исследования

Целью работы является экспериментальное исследование твердофазного восстановления железа и фосфора из бурых железняков Аятского месторождения с предварительным окислительным обжигом и возможности магнитного разделения.

### Методика проведения экспериментов

Использовали оолитовый бурый железняк Аятского месторождения (Казахстан) с высоким содержанием фосфора. Оолиты – это осадочные породы, образованные из ооидов, которые представляют собой сферические зерна, состоящие из концентрических слоев. Ооиды могут быть диаметром от 0,25 до 2 мм [21]. Среднее содержание Fe по месторождению составляет 37,1 %, фосфора – 0,37–0,40 %. Минералами аятских руд являются гетит и гидрогетит (20–60 %), лептохлориты (11–44 %), сидерит (3–50 %), из нерудных – глауконит и глинистые минералы [22].

Исходную руду подвергали окислительному обжигу с целью удаления влаги, в результате чего руда частично обогащается. Окислительный обжиг проводили в муфельной печи фирмы «Nabertherm». Тигель помещали в рабочую зону печи, печь закрывали, нагревали до температуры 900 °С и выдерживали 10 мин. По данным предварительных экспериментов, повышение температуры обжига выше 900 °С нецелесообразно, при дальнейшем повышении температуры масса материала остается неизменной. Обожженные образцы и образцы исходной руды заливали эпоксидной смолой, шлифовали и исследовали на электронном микроскопе с определением химического состава участков микрорентгеноспектральным методом.

Обожженные образцы подвергли металлизации в восстановительной атмосфере СО, при различных температурах с одинаковым временем выдержки. Восстановительный обжиг провели в закрытой печи сопротивления с угольным нагревателем (печь Таммана) без анализа состава газовой фазы рабочего пространства. Использование угольного нагревателя гарантировало наличие в объеме рабочего пространства печи восстановительной атмосферы, состоящей из азота и монооксида углерода. В рабочее пространство печи устанавливали корундовый тигель с обожженной рудой. Печь нагревали до требуемой температуры (800, 900, 1000 и 1050 °С) и выдерживали 3 ч. В данном интервале температур возможно селективное разделение фосфора и железа при восстановлении. При меньшей температуре железо имеет низкую степень восстановления, а фосфор точно не восстанавливается. После выдержки печь отключали, образцы охлаждали вместе с печью до комнатной температуры. Образцы разделили на магнитную и немагнитную части с помощью постоянного магнита [23], без дробления, после чего подготовили образцы для исследования на электронном микроскопе.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 представлены изображения участков исходной (а) и обожженной руды (b) с электронного микроскопа. Оолиты в основном имеют круглую, реже овальную форму, для них характерно скорлуповато-концентрическое строение. В табл. 1 представлен химический состав исходной руды, полученный с помощью микрорентгеноспектрального анализа на электронном микроскопе.

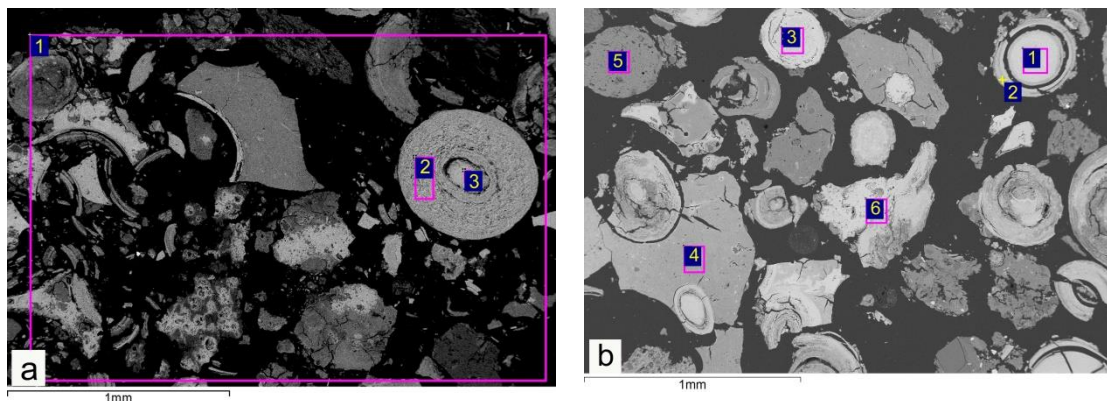


Рис. 1 Оолитовая железная руда: а – исходная, b – обожженная

Можно отметить, что пустая порода состоит в основном из оксидов кремния и алюминия (участок 5, рис. 1, *b*). Фосфор расположен в оолитах, в пустой породе практически нет (участок 2 и 3, рис. 1, *a*, участок 1–3, 5, рис. 1, *b*).

Таблица 1  
Химический состав исходной руды, ат. %

Участок	O	Mg	Al	Si	P	S	Fe
1	71.3	0.5	4.8	7.9	0.2	0.4	14.8
2	72.4	0.2	3.1	1.7	0.3	0.0	22.3
3	73.5	0.0	1.9	1.1	0.5	0.0	23.0

Оолитовая железная руда Аятского месторождения, как в исходном виде, так и после окислительного обжига немагнитная. Состав полученного обожженного концентрата приведен в табл. 2.

Таблица 2  
Химический состав обожженной руды при температуре 900 °С, с временем выдержки 10 мин., ат. %

Участок	O	Mg	Al	Si	P	Fe
1	62.2	0.6	3.8	1.9	0.8	30.7
2	61.6	0.5	4.6	2.1	1.0	30.1
3	66.4	–	3.6	1.8	0.4	27.7
4	68.9	0.8	7.9	11.9	–	10.5
5	70.0	0.7	8.4	16.5	0.1	4.2
6	66.2	0.7	1.8	2.7	0.3	28.2

При окислительном обжиге за счет удаления влаги и частичному удалению серы, потеря массы составила 17,2 %, и это привело к увеличению количества железа в образцах.

Результаты по восстановлению железа из оолитовой руды в восстановительной атмосфере CO, представлены на рис. 2–4 и в табл. 3–4. После восстановительного обжига концентрат приобретает магнитные свойства, т. к. при данных условиях, железо частично восстановилось до магнетита и что привело к появлению магнитных свойств.

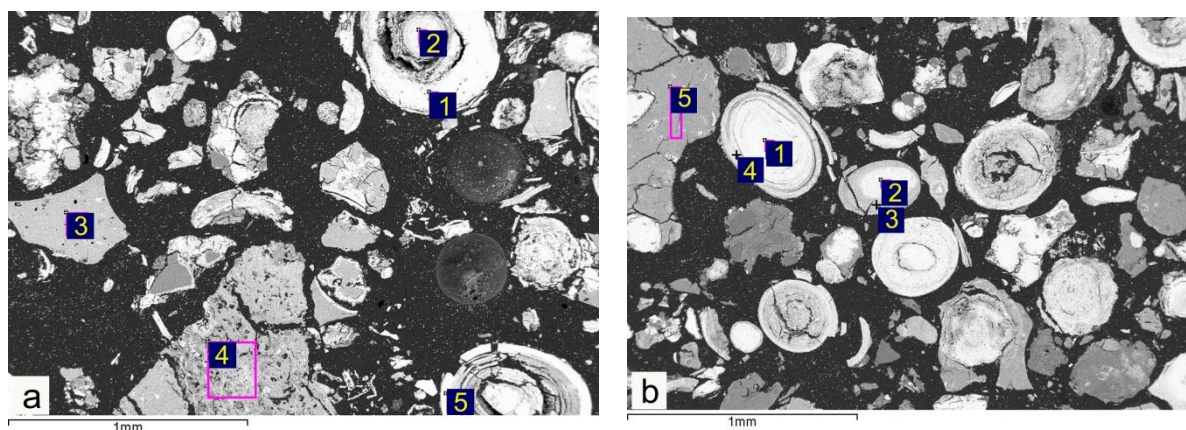


Рис. 2 Вид участков магнитной (*a*) и немагнитной (*b*) части после восстановительного обжига при температуре 800 °С и время выдержки 3 ч

Согласно данным, приведенным в табл. 3 и при анализе изображения на рис. 2 можно выявить, что в атмосфере CO при температуре 800 °С и с времени выдержки 3 ч восстановление железа до металла в структуре оолита не произошло (отсутствуют яркие белые выделения металлической части). Оолиты с содержанием оксида железа присутствуют как в магнитной, так и в немагнитной части, эффективности в разделении нет. Содержание фосфора при металлизации в образцах не изменяется.

Таблица 3

Содержание элементов в участках образцов после восстановительного обжига при температуре 800 °С и время выдержки 3 ч ат. %

Участок	O	Al	Si	P	Fe
1a	64.2	2.8	2.6	0.6	29.8
2a	64.7	4.1	3.0	0.6	27.7
3a	67.4	9.1	16.2	0.0	7.3
4a	66.4	9.6	15.6	0.2	8.2
5a	64.0	3.9	1.6	0.5	30.1
1б	65.7	3.9	1.2	0.4	28.8
2б	65.9	3.0	2.0	0.7	28.5
3б	61.3	4.4	2.4	0.7	31.2
4б	68.5	3.5	2.1	0.4	25.5
5б	67.2	9.7	14.1	0.1	8.9

На рис. 3 видны участки восстановленного металла в структуре оолита (яркие белые пятна) при температурах 900, 950, 1000 и 1050 °С, с временем выдержки 3 ч.

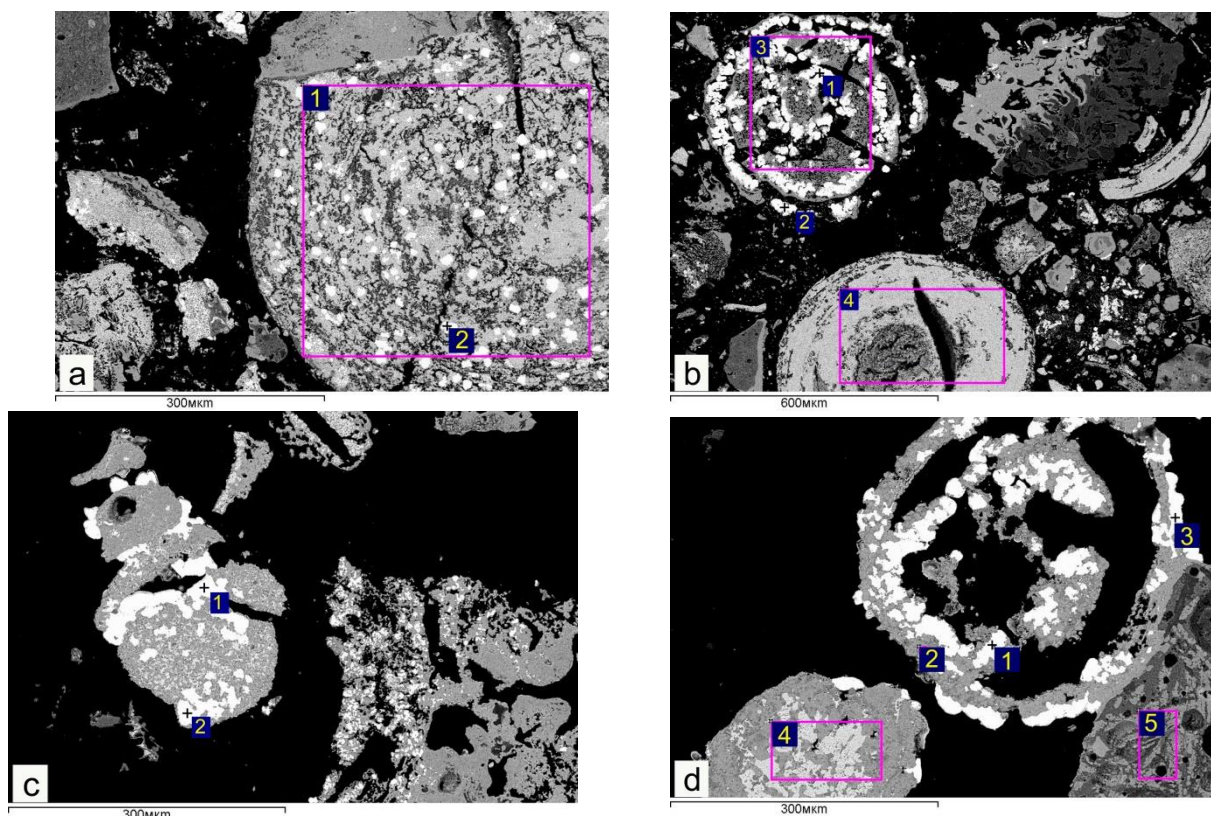


Рис. 3 Вид участков магнитной части после восстановительного обжига при температурах 900 (a), 950 (b), 1000 (c) и 1050 °С (d) и время выдержки 3 ч

Проанализированы при температурах 900, 950, 1000 и 1050 °С содержания элементов в участках образца (табл. 4). Повышение температуры восстановления до 1050 °С способствует уменьшению содержания железа в оксидной фазе (участок 2, рис. 3, d), в то же время содержание фосфора в металле остается неизменным и составляет 0.1 ат. % (табл. 4. участок 2, a, 1, б и 3, б).

Таблица 4

Содержание элементов в участках образцов после восстановительного обжига при температурах 900, 950, 1000 и 1050 °С и время выдержки 3 ч ат. %

Т обжига, °С	Участок	O	Al	Si	P	S	Fe
900	1a	58.2	2.3	5.6	0.6	00.0	33.3
	2a	0.0	00.0	00.0	0.1	00.0	99.9
950	1b	0.0	00.0	00.0	0.0	00.0	100
	2b	0.0	00.0	00.0	0.0	00.0	100
	3b	49.6	10.2	3.6	1.2	00.0	35.3
	4b	59.2	4.6	2.9	0.4	00.0	32.9
1000	1c	0.0	0.0	00.0	0.0	00.0	100.0
	2c	0.0	0.0	00.0	0.1	00.0	99.9
1050	1d	0.0	0.0	00.0	0.1	00.0	99.9
	2d	64.2	2.0	11.2	0.4	00.0	22.3
	3d	0.0	0.0	00.0	0.1	00.0	99.9
	4d	59.4	4.4	5.2	0.3	1.5	29.2
	5d	65.1	9.1	12.9	0.2	00.0	12.7

По снимкам с электронного микроскопа (рис. 4) можно увидеть, что при разделении на магнитную и немагнитную части после восстановления при температуре 900 °С, большинство оолитовых частиц переходят в магнитную часть, таким образом в магнитной части пустой породы становится меньше чем в исходной руде.

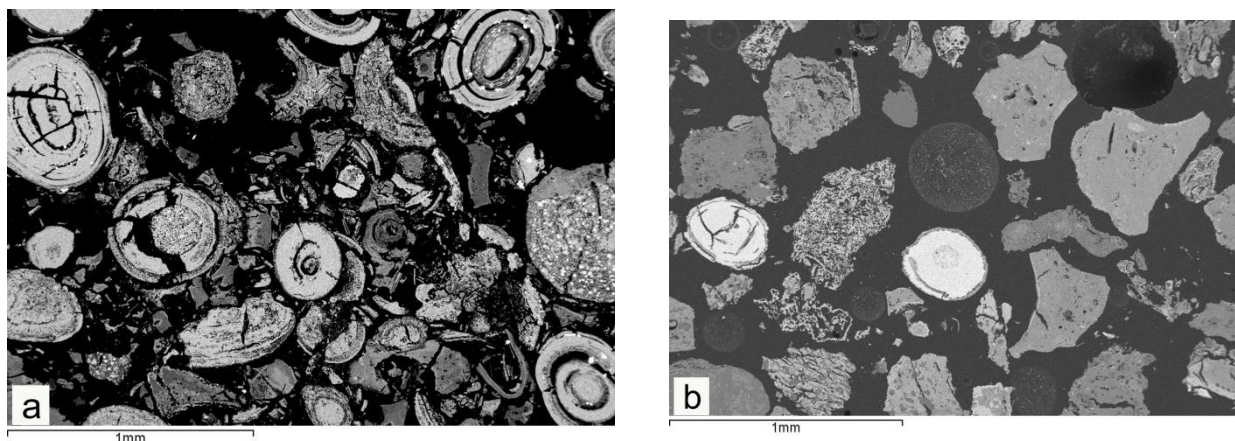


Рис. 4 Вид участков магнитной и немагнитной части после восстановительного обжига при температуре 900 °С и время выдержки 3 часа

### Заключение

Оолитовая железная руда Аятского месторождения, как в исходном виде, так и после окислительного обжига немагнитная. При окислительном обжиге за счет удаления углекислоты карбонатов, гидратной влаги и частичному удалению серы, потеря массы составила 17,2 %. Только после восстановительного обжига предварительно окисленная руда приобретает магнитные свойства.

Установлено, что при температуре 800 °С в атмосфере СО железо и фосфор не восстанавливаются.

Результаты исследования показали что после восстановительного обжига предварительно окисленной оолитовой руды при температурах 950, 1000, 1050 °С в металлической фазе содержится 0.1 ат. % фосфора.

## Библиографический список

1. Лютоев В. П. Керченские оолитовые железные руды и возможности их технологической модификации / В. П. Лютоев, В. И. Силаев, А. Ю. Лысюк, С. С. Шевчук // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2016. – №1 (253). – С. 18–29.
2. Николаева И. В. Бакчарское месторождение оолитовых железных руд / И. В. Николаева. – Новосибирск : АН СССР, 1967. – 129 с.
3. Казанский Ю. П. О составе верхнемеловых осадочных железных руд Томской области / Ю. П. Казанский // Известия Томского ордена Красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова. – Томск, 1960 – Т. 92. – С. 158–166.
4. Смирнов Л. А. Вовлечение в производство Лисаковского концентрата – одно из направлений расширения железорудной базы Урала и Сибири / Л. А. Смирнов, А. А. Бабенко // Матер. Междунар. конгр. «300 лет Уральской металлургии». – Екатеринбург. – 2001. – С. 48–49.
5. Мирко В. А. Современное состояние развития месторождений бурых железняков Казахстана / В. А. Мирко, Ю. Кабанов, В. Найденев // Промышленность Казахстана. – 2002. – № 1. – С. 79–82.
6. Адамчук В. А. Оценка и пути использования железных руд Кустанайской области / В. А. Адамчук // Тр. Объединенной Кустанайской сессии. Т. 3. – Алма-Ата, 1958. – С. 92–123.
7. Тигунов Л. П. Современные технологические решения переработки железосодержащих руд Бакчарского месторождения / Л. П. Тигунов, С. И. Ануфриева, Е. С. Броницкая, Г. К. Кривоконова [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2010. – № 2. – С. 37–43.
8. Парфенов А. М. Обогащение и агломерация аятских бурых железняков // Оолитовые бурые железняки Кустанайской области и пути их использования / А. М. Парфенов, Т. И. Юденич ; под ред. И. П. Бардина. – Москва : Изд. АН СССР. 1956. – С. 149–188.
9. Карелин В. Г. Комбинированная пиро-гидрометаллургическая технология обесфосфоривания бурого железняка Лисаковского месторождения / В. Г. Карелин [и др.] // Черная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 10–15.
10. Карелин В. Г. Особенности пиро-гидрометаллургической технологии обесфосфоривания бурого железняка Лисаковского месторождения / В. Г. Карелин // Сталь. – 2015. – № 3. – С. 8–11.
11. Sun Y. S., Han Y. X., Gao P., Wang Z. H., Ren D. Z. Recovery of iron from high phosphorus oolitic iron ore using coal-based reduction followed by magnetic separation // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. – 2013. – Т. 20. – №. 5. – С. 411–419.
12. Kimberley M. M. Exhalative origins of iron formations. Ore Geology Reviews. 1989. vol. 5 (1–2). pp. 13–145.
13. Afify A. M., Sanz\_Montero M. E., Calvo J. P. Differentiation of ironstone types by using rare earth elements and yttrium geochemistry – a case study from the Bahariya region. Egypt. Ore Geology Reviews. 2018. vol. 96. pp. 247–261.
14. Mhcke A. Part II. Postdiagenetic Ferruginization of Phanerozoic (oolitic) Ironstones: a Contribution to their Geneses. Developments in Sedimentology. 1994. vol. 51. pp. 396–423.
15. Van Houten F. B., Bhattacharyya D. P. Phanerozoic Oolitic Iron stones – Geologic Record and Facies Model. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 1982. vol. 10 (1). pp. 441–457.
16. Young T. P. Phanerozoic ironstones: an introduction and review. Geological Society Special Publication. 1989. vol. 46. pp. 9–25.
17. Petranek J., Van Houten F.B. Phanerozoic ooidal ironstones. Czech Geological Survey Special Papers. 1997. vol. 7. pp. 4–71.



18. Maynard J. B. Geochemistry of oolitic iron ores. an electron microprobe study. *Economic Geology*. 1986. vol. 81 (6). pp. 1473–1483.
19. Sturesson U. Lower Palaeozoic iron oolites and volcanism from a Baltoscandian perspective. *Sedimentary Geology*. 2003. vol. 159 (3–4). pp. 241–256.
20. Kimberley M. M. Debate about ironstone: has solute supply been surficial weathering, hydrothermal convection, or exhalation of deep fluids? *Terra Nova*. 1994. vol. 6 (2). pp. 116–132.
21. Вегман Е. Ф. *Металлургия чугуна* / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев [и др.] ; под редакцией Ю. С. Юсфина. – Москва : Академкнига, 2004. – 774 с.
22. Министерство по инвестициям и развитию республики Казахстан (комитет геологии и недропользования). – URL : <http://geology.mid.gov.kz/ru>.
23. Копченова Е. В. *Минералогический анализ шлихов* / Е. В. Копченова. – Москва : Госгеолтехиздат, 1951.

## **ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ВЫТЯЖКИ МЕТОДАМИ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ**

**Табакон Владимир Петрович,  
Кокорин Валерий Николаевич,  
Морозов Олег Игоревич,**

E-Mail: [olmorozov-rabota@yandex.ru](mailto:olmorozov-rabota@yandex.ru),

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»,

**Корняков Евгений Львович,  
АО «Ульяновский патронный завод»**

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы повышения стойкости рабочих деталей штампов с помощью нанесения износостойких покрытий методами ионно-плазменного напыления. Представлены результаты производственных испытаний штампового инструмента с износостойким покрытием на основе нитрида титана на формоизменяющих операциях листовой штамповки.

**Ключевые слова.** Штамп, покрытие, износостойкость, нитрид титана, ионно-плазменное напыление.

В машиностроительном производстве в процессах листовой штамповки большое значение имеет износостойкость рабочего инструмента – рабочих поверхностей пуансонов и матриц. В настоящее время существует несколько основных способов повышения стойкости и упрочнения рабочих поверхностей инструментальной оснастки – термическая обработка (закалка с последующим отпуском и т. д.), поверхностное легирование, поверхностное пластическое деформирование, нанесение износостойких покрытий. Анализ научно-технической литературы позволяет сделать вывод, что одним из наиболее перспективных методов повышения стойкости штампового инструмента в настоящий момент является применение износостойких покрытий, осаждаемых физическими методами. В настоящее время методы поверхностной модификации с использованием износостойких покрытий широко реализованы лишь в технологии повышения стойкости режущего инструмента (резцы, сверла и др.) и на данный момент не получили широкого применения для повышения стойкости пуансонов и матриц в процессах обработки металлов давлением, где необходимо производить комплексную модификацию системы «подложка – покрытие» [1].

Рабочий инструмент штампов (пуансоны и матрицы) работает в тяжелых условиях наличия: ударных, знакопеременных нагрузок; особенностей сил трения между обрабатываемым материалом и инструментом, контактных сил на рабочей поверхности, что приводит к формированию интенсивных условий напряженно-деформированного состояния. Следует отметить, что в настоящее время в качестве инструментальных материалов, на которые наносится износостойкие покрытия, в основном выступают порошковые твердые сплавы на основе титана и вольфрама, теплостойкие и полутеплостойкие стали, быстрорежущие стали, поскольку процесс нанесения износостойких покрытий предполагает наличие ограничений по температуре обработки. Данные материалы обладают повышенными физико-механическими характеристиками, а также себестоимостью и предполагают большие затраты на изготовление и обслуживание готового инструмента.

Целью настоящих исследований являлось расширение технологических возможностей процессов нанесения износостойких покрытий путем увеличения номенклатуры материалов для изготовления штампового инструмента, используемого для последующего нанесения износостойких покрытий. Из справочных материалов [2–5] известно, что инструментальные стали, которые в своем составе содержат хрома более 1 %, при нагреве до температур 300–400 °С подвергаются процессу поверхностного упрочнения вследствие выделения в наружных слоях материала карбидов хрома в виде тонких прочных кристаллитов. Одновременно с этим сердцевина материала приобретает повышенные пластические и упругие свойства.

В Ульяновском государственном техническом университете (УлГТУ) совместно с АО «Ульяновский патронный завод» в настоящий момент проводятся исследования возможности промышленного внедрения технологии повышения стойкости штампового инструмента с использованием износостойких покрытий на основе нитрида титана методами ионно-плазменного напыления с применением катодно-ионной бомбардировки поверхности (КИБ) [2–5].

Проведены производственные испытания штампового инструмента для формоизменяющих операций (вытяжка с утонением и обжим дульца) с покрытием на основе нитрида титана при изготовлении деталей типа «Гильза» номенклатуры АО «Ульяновский патронный завод».

Сотрудниками кафедр «Материаловедение и обработка металлов давлением» и «Инновационные технологии в машиностроении» УлГТУ совместно с предприятием АО «Ульяновский патронный завод» с целью определения эффективности использования износостойких покрытий для увеличения ресурса штампового инструмента из углеродистых инструментальных сталей (сталь марки У10А) на формоизменяющих операциях (вытяжка с утонением и обжим дульца) была проведена серия опытно-промышленных испытаний штампового инструмента с износостойким покрытием TiN, нанесенным методами ионно-плазменного напыления и КИБ. Испытания проводились на роторных линиях для изготовления гильз патронов на предприятии АО «Ульяновский патронный завод».

Рабочие камеры установки для нанесения покрытий модели «Булат-6» лаборатории износостойких покрытий машиностроительного факультета УлГТУ накладывают ограничения по геометрическим параметрам обрабатываемого инструмента. Соответственно этим требованиям для проведения производственных испытаний из номенклатуры инструментальной оснастки АО «Ульяновский патронный завод» были отобраны следующие комплекты рабочего штампового инструмента (рис. 1):

- 1) твердосплавные матрицы (твердый сплав марки ВК-8) и пуансоны из инструментальной стали (сталь марки У10А) для вытяжки с утонением (2-й переход) на диаметр 10 мм;

- 2) калибровочные втулки из быстрорежущей стали (сталь марки Р6М5) для операции обжим дульца на диаметр 6 мм.

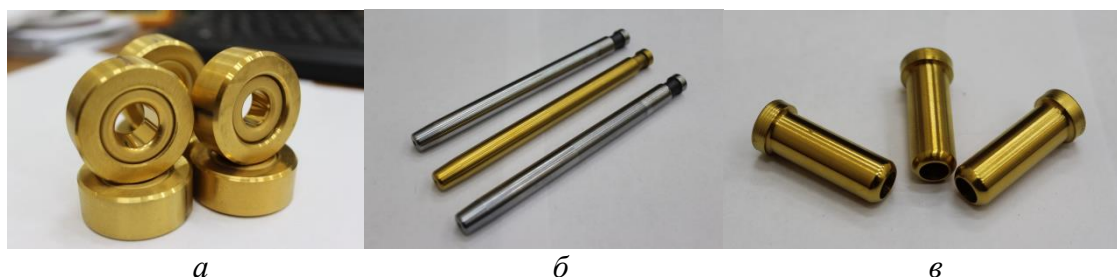


Рис. 1. Штамповый инструмент с покрытием:

*а* – матрицы для вытяжки; *б* – пуансоны для вытяжки; *в* – втулки для операции обжим дульца

Испытания штампового инструмента проводились в несколько последовательных этапов, заключающихся в следующем:

- был произведен отбор и предварительная подготовка инструмента;
- рабочие поверхности инструмента были подвергнуты шлифованию и полировки до 8 класса точности;
- инструмент перед нанесением износостойкого покрытия подвергался предварительному нагреву и выдержке в вакуумной камере установки при температуре 350 °С для повышения адгезионной способности поверхностного слоя и равномерного прогрева материала.

– на три комплекта инструмента соответственно для каждой выбранной операции (пуансон + матрица – для вытяжки с утонением, калибровочная втулка – для операции обжим дульца) методом ионно-плазменного напыления и КИБ на установке «Булат-6» с обеспечением вращения обрабатываемого инструмента в рабочей камере было нанесено износостойкое покрытие нитрид титана (использованы следующие режимы нанесения покрытий – нагрев до 350–450 °С, толщина покрытия по сечению – 3–5 мкм);

– комплекты обработанного инструмента с покрытием были установлены попарно вместе со стандартными необработанными комплектами в роторные линии для тестового анализа;

– в ходе испытаний фиксировался выход инструмента из строя по счетчику произведенных операций (смыкание инструмента для операций вытяжки с утонением и калибровки соответственно) и причина выхода инструмента из строя (дефекты на поверхности изготавливаемых изделий, заклинивание инструмента и т. д.).

После завершения испытаний был произведен анализ полученных результатов, представленных в табл. 1.

Анализ результатов позволил сделать вывод, что для операции «обжим дульца» как обработанный, так и не обработанный инструмент вырабатывает наработку, превышающую установленную норму. Это явление можно объяснить тем, что обе группы инструмента подвергались дополнительной обработке поверхности – шлифованию до 8 класса точности, что повысило точность поверхности, а следовательно, и его производственный ресурс. Однако для инструмента с покрытием повышение стойкости и ресурса инструмента по сравнению с необработанным не наблюдается. Этот эффект может быть объяснен следующим образом: на данной операции (обжим дульца) реализуется пластическая деформация с высокими значениями сдвиговых напряжений в очаге деформации, что приводит к формированию высоких значений сил контактного трения. В результате модифицированный инструмент не обладает достаточным ресурсом для значительного увеличения износостойкости поверхностного слоя, поскольку при наличии высоких значений сил контактного трения и напряжений, превышающих значения стягивающих напряжений внутри сформированного покрытия, и возникает риск сдвига поверхностных слоев относительно друг друга, а следовательно, разрушения износостойкого покрытия и сформированной тонкой упрочненной структуры.

Таблица 1

## Результаты производственных испытаний штампового инструмента

Операция	№ п/п блоков	Материал инструмента	Покрытие	Норма выработки, тыс. ударов	Общая выработка, тыс. ударов	Причины замены инструмента	Примечание
Вытяжка (2 переход)	1	Пуансон – инструментальная сталь У10А; Матрицы (верхняя и нижняя) – твердый сплав	TiN	50–100	249	Заклинивание инструмента*	Вследствие дефекта на предыдущем переходе вытяжки
	2		б\п		534		
	3		TiN		699	Дефекты на поверхности деталей (царапины, риски)	
	4		б\п		674		
	5		TiN		986		
	6		б\п		709		
Обжим дульца	1	Втулка – быстрорежущая сталь Р6М5 (заменитель – У12А)	TiN	50	82	Дефекты на поверхности деталей (царапины, риски)	
	2				82		
	3				111		
	4				145		
	5		б\п		180		
	6				196		
	7				213		
	8				117		

Для операции же вытяжки с утонением наблюдаются следующие результаты: 1-й и 2-й блок вышли из строя по независящим от наличия покрытий условиям (из-за дефекта заготовки на 1 переходе вытяжки произошло заклинивание инструмента), при этом он показал стойкость, превышающую норму выработки; 3-й (модифицированный) и 4-й (без покрытия) блоки продемонстрировали приблизительно равную стойкость, превышающую в 5–6 раз норму выработки, предусматриваемую нормативными документами, при этом модифицированный пуансон проработал дольше, чем пуансон без покрытия; модифицированный пуансон на 5-м блоке показал наилучшие результаты и проработал количество циклов, превышающее на 29 % количество циклов, которое проработал самый стойкий неупрочненный инструмент (6-й блок). Также было установлено, что на операции вытяжки с утонением пуансоны, изготовленные из углеродистой, стали марки У10А и подвергнутые нанесению износостойкого покрытия в вакуумной камере с температурой 350–450 °С, в процессе обработки не подверглись отпуску и потере технологической устойчивости, а наоборот, демонстрируют повышение износостойкости и адгезионной способности. Данный эффект в полной мере объясняется процессом упрочнения и образования карбидного слоя, описанным выше.

На основании полученных в ходе экспериментальных исследований результатов был произведен анализ и подбор рациональных режимов обработки поверхностного слоя инструмента под наносимое износостойкое покрытие. Было выявлено следующее: геометрические параметры инструмента, пригодного для модификации, ограничиваются не только габаритными размерами рабочих камер установок для нанесения покрытий, но и возможностями инструмента сохранять технологическую устойчивость в процессе обработки – диаметры и линейные размеры в расчетных сечениях должны быть не менее 8–10 мм, соотношение длины и диаметра (ширины) обрабатываемой детали должны не превышать соотношения 1 к 12-ти, в обратном случае, в результате неравномерного прогрева в поверхностном слое происходят процессы разупрочнения и разрушения благоприятной структуры либо пережиг материала с образованием хрупких концентраторов напряжений; температурный интервал нанесения покрытий должен быть ограничен температурами, не превышающими 400 °С, во избежание процессов термического разупрочнения в поверхностном слое инструмента и снижения адгезионной способности системы «подложка – покрытие»; операции листовой и объемной штамповки (обжим, чистовые операции с высокими сжимающими усилиями), подразумевающие «жесткие» схемы напряженно-деформированного состояния в рабочей зоне деформации и высокие

(превышающие предел упругости износостойкого покрытия) значения сил контактного трения, не предполагают возможность применения данной технологии, поскольку происходящие при данных процессах взаимодействия полностью нивелируют результаты упрочнения поверхностного слоя инструмента; наиболее благоприятными режимами деформирования подложки под наносимое износостойкое покрытие являются значения относительной деформации в диапазонах от 10 до 30 %.

#### Библиографический список

1. Табаков В. П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В. П. Табаков. – Москва : Машиностроение, 2008. – 311 с.; ил.
2. Баннов П. Г. Процессы переработки нефти / П. Г. Баннов. – Москва : ЦНИИТЭнефте-хим, 2000. – 224 с.
3. Дамаскин Б. Б. Введение в электрохимическую кинетику : учебное пособие для студентов хим. спец. ун-в / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1983. – 400 с., ил.
4. Дубовкин Н. Ф. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив : справочник / Н. Ф. Дубовкин, В. Г. Маланичева, Ю. П. Массур, Е. П. Федоров. – Москва : Химия, 1985. – 240 с., ил.
5. Ерохин М. Н. Повышение износостойкости прецизионных деталей гидравлических систем сельскохозяйственной техники / М. Н. Ерохин, Н. Н. Чупятов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2014. – № 3. – С. 7–10.

### **ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИТРИДА НИОБИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

**Табаков Владимир Петрович,**  
**Худобин Леонид Викторович,**  
Ульяновский государственный технический университет,  
**Чихранов Алексей Валерьевич,**  
E-Mail: [chihranov@mail.ru](mailto:chihranov@mail.ru),  
**Долженко Яна Артуровна,**  
Ульяновский институт гражданской авиации  
имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева

**Аннотация.** В работе рассмотрены однослойные износостойкие покрытия на основе нитрида ниобия, осажденные на твердосплавный режущий инструмент. Выявлено влияние состава покрытий на структурные параметры, механические свойства и трещиностойкость. Показано, что применение разработанных покрытий позволяет повысить работоспособность режущего инструмента.

**Ключевые слова.** Режущий инструмент, износостойкое покрытие, механические свойства, трещиностойкость, интенсивность износа.

В настоящее время повышению работоспособности режущего инструмента уделяется большое внимание. Поэтому для повышения эксплуатационных характеристик на большинство быстрорежущего и твердосплавного режущего инструмента наносятся износостойкие покрытия [1–5]. Такой режущий инструмент обладает более высокими механическими свойствами, трещиностойкостью и, следовательно, работоспособностью [6–9]. Среди износостойких покрытий наиболее широкое применение находят покрытия на основе

простых и сложных нитридов тугоплавких элементов, в первую очередь – нитрида титана, циркония, хрома, молибдена, алюминия. Среди покрытий особый интерес представляют покрытия на основе нитрида ниобия, которые обладают низкой теплопроводностью, что позволяет снизить тепловой поток в режущий клин инструмента [10, 11].

Исследованию подвергались покрытия на основе нитрида ниобия NbN, NbTiN, NbZrN, NbTiZrN, NbTiAlN и NbTiCrN толщиной 6 мкм. Покрытия наносились на установке «Булат-6» на пластины из твердого сплава МК8. Химический состав покрытий определяли методом количественного рентгеноструктурного анализа на установке MAP-4 с учетом ZAF-поправок. Периоды кристаллической решетки  $a$  и  $c$  и остаточные сжимающие напряжения  $\sigma_0$  исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра «ДРОН-3М» [12]. Микротвердость  $H_m$ , модуль упругости  $E$ , предел текучести  $\sigma_T$  и вязкость разрушения  $K_{IC}$  определяли по методике, описанной в работе [10]. Расчет трещиностойкости покрытий осуществляли по методике работы [13]. Работоспособность твердосплавного инструмента определяли при продольном тчении заготовок из конструкционной стали 30ХГСА.

Химический состав покрытий, значения параметров кристаллической решетки  $a$  и  $c$ , вектора Бюргерса  $b$  и длины зародышевой микротрещины  $l_0$  представлены в табл. 1.

Установлено, что покрытия на основе нитрида ниобия являются однофазными и имеют тетрагональную кристаллическую решетку. Наличие в составе покрытий титана приводит к росту значений вектора Бюргерса  $b$  и длины зародышевой микротрещины  $l_0$ .

Таблица 1  
Химический состав и структурные параметры покрытий

Покрытие	Содержание элементов, % ат.					$a$ , нм	$c$ , нм	$b$ , нм	$l_0$ , нм
	Nb	Ti	Zr	Al	Cr				
TiN	–	100	–	–	–	0,4241	–	0,2999	0,5998
NbN	100	–	–	–	–	0,3015	0,5715	0,3015	0,6030
NbTiN	42,6	57,4	–	–	–	0,4399	0,8684	0,4399	0,8798
NbZrN	41,8	–	58,2	–	–	0,3007	0,5715	0,3007	0,6014
NbTiZrN	46,5	41,9	11,6	–	–	0,4372	0,8791	0,4372	0,8744
NbTiAlN	49,2	40,0	–	10,8	–	0,4449	0,8704	0,4372	0,8898
NbTiCrN	43,8	48,1	–	–	8,1	0,4458	0,8404	0,4458	0,8916

Значения механических свойств покрытий представлено в табл. 2. Покрытия сложного состава отличаются большей микротвердостью  $H_m$  и высокими значениями модуля упругости  $E$  и предела текучести  $\sigma_T$ . При этом для трехэлементных покрытий характерно значительное увеличение вязкости разрушения  $K_{IC}$ : на 21 – 30 % по сравнению с покрытием нитрида ниобия.

Таблица 2  
Механические свойства покрытий

Покрытие	$H_m$ , ГПа	$E$ , ГПа	$K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$\sigma_T$ , ГПа
TiN	26,2	327	8,76	9,53
NbN	29,8	467	9,78	9,67
NbTiN	31,3	422	10,16	10,7
NbZrN	32,1	428	9,97	10,61
NbTiZrN	32,9	496	11,84	11,12
NbTiAlN	32,1	455	12,76	10,91
NbTiCrN	33,4	448	12,69	11,42

Определение контактных характеристик процесса резания, температур и напряжений, действующих в режущем клине инструмента, проводили путем аналитического расчета действующих на передней и задней поверхностях режущего клина инструмента удельных нагрузок и температур по методикам работ [14, 15] с последующим численным расчетом методом конечных элементов в пакете программ ANSYS.

Расчеты показывают изменение теплового и напряженного состояния режущего инструмента с покрытиями на основе нитрида ниобия (табл. 3).

Таблица 3  
Теплонапряженное состояние и характеристики трещиностойкости покрытий и инструментальной основы

Покрытие	Инструментальная основа		Покрытие				$t_1$ , мин	$t_2$ , мин	$t_{\Sigma}$ , мин
	$T_{\max}$ , °C	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_{\text{Терм}}$ , МПа	$\sigma_{\Sigma}$ , МПа			
TiN	1106	831	-775	513	-1910	-2172	1,63	7,28	8,91
NbN	1039	815	-2280	718	-3075	-3075	10,74	8,11	18,85
NbTiN	1120	779	-1497	620	-2709	-2709	6,55	12,16	18,71
NbZrN	1130	788	-2661	636	-1934	-1934	5,04	12,27	17,31
NbTiZrN	1132	736	-1704	689	-3021	-2729	11,36	15,76	27,12
NbTiAlN	1126	747	-1923	641	-2729	-3021	12,80	16,07	28,87
NbTiCrN	1137	751	-1941	534	-2819	-2819	9,83	16,58	26,41

Как было показано в работах [10, 16], покрытия на основе нитрида ниобия обладают низкой теплопроводностью. Это позволяет несколько снизить температуру на передней поверхности режущего инструмента под покрытием в твердосплавной основе как за счет изменения контактных характеристик резания, так и за счет снижения теплопроводности покрытий. Наиболее низкой максимальной контактной температурой  $T_{\max}$  обладает покрытие NbN, в то время как покрытия сложного состава имеют температуру незначительно (на 1,2 – 2,8 %) большую по сравнению с нитридом титана.

В то же время покрытия сложного состава снижают величину напряжений в инструментальной основе  $\sigma_x$  на 4–9 % по сравнению с покрытием NbN и на 5–12 % по сравнению с покрытием TiN.

Учитывая теплофизические свойства покрытий, температурное и напряженное состояния режущего клина инструмента были рассчитаны напряжения, возникающие в покрытиях из-за разности с инструментальной основой модулей упругости  $\sigma_1$ , коэффициентов термического расширения  $\sigma_{\text{Терм}}$ . Суммарные напряжения в покрытиях, с учетом возникающих в процессе осаждения остаточных напряжений  $\sigma_0$ , позволяют констатировать более благоприятную картину для покрытия NbN и трехэлементных покрытий сложного состава.

Расчет времени циклической трещиностойкости по методике работы [13] показал, что покрытия на основе нитрида ниобия более эффективно сопротивляются процессам трещинообразования. Высокие значения сжимающих напряжений в совокупности с более благоприятным сочетанием теплового и напряженного состояний обеспечивают режущему инструменту с покрытиями на основе нитрида ниобия увеличение времени до начала развития трещины в покрытии  $t_1$  в 3,1–7,9 раза. Развитию же трещины на стадии ее роста разные покрытия сопротивляются по-разному. В этом случае покрытия сложного состава, обладающие высокими механическими свойствами, характеризуются большими значениями времени до образования сквозной трещины в покрытии  $t_2$ . В итоге суммарное время до начала появления трещин в покрытии (время циклической трещиностойкости)  $t_{\Sigma}$  имеет наибольшие значения для трехэлементных покрытий NbTiCrN, NbTiZrN и NbTiAlN. По сравнению с покрытием NbN для этих покрытий величина времени  $t_{\Sigma}$  возрастает приблизительно в 1,5 раза, а по сравнению с покрытием TiN – в 3–3,2 раза.

Исследование работоспособности режущего инструмента с покрытиями показало корреляционную связь снижения интенсивности износа режущего инструмента с увеличением трещиностойкости покрытий (рис. 1).

Использование покрытий сложных составов NbTiCrN, NbTiZrN и NbTiAlN позволяет снизить интенсивность износа режущего инструмента в 1,8–2,1 раза по сравнению с покрытиями TiN и NbN, и в 1,6–1,9 раза – по сравнению с покрытием NbTiN.

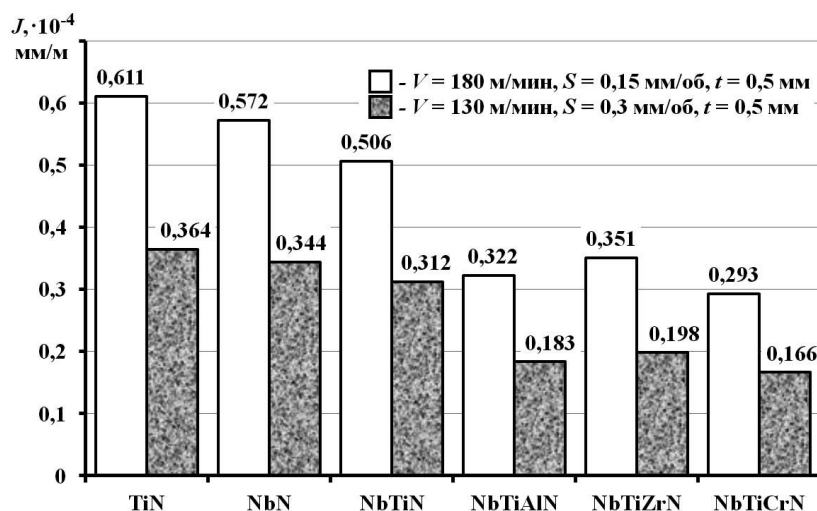


Рис.1 Влияние состава покрытия на интенсивность износа режущего инструмента с износостойкими покрытиями

Проведенные исследования показали высокую эффективность использования режущего инструмента с разработанными покрытиями на основе нитрида ниобия.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (грант № 18-48-730011).*

#### Библиографический список

1. Мокрицкий Б. Я. Управление работоспособностью инструмента при нанесении покрытий / Б. Я. Мокрицкий // СТИН, 2010. – № 11. – С. 11–15.
2. Tabakov V. P., Chikhranov A. V. Multicomponent nitride coatings for improving tool performance // Russian engineering research, 2009. – Т. 29. – № 10. – P. 1047–1053.
3. Tabakov V. P., Chikhranov A. V. Selecting the Composition of Wear-Resistant Coatings // Russian Engineering Research, 2018. – V. 38. – Issue 2. – P. 105–109
4. Volosova M. A., Gurin V. D. Influence of vacuum-plasma nitride coatings on contact processes and a mechanism of wear of working surfaces of high-speed steel cutting tool at interrupted cutting // Journal of Friction and Wear, 2013. – V. 34 (3). – P. 183–189.
5. Santecchia E., Hamouda A., Musharavati F., Zalnezhad E., Cabibbo M., Spigarelli S. Wear resistance investigation of titanium nitride-based coatings // Ceramics International, 2015. – V. 41. – P. 10349–10379 <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.152>.
6. Vereschaka A. A., Grigoriev S. N. Study of cracking mechanisms in multi-layered composite nanostructured coatings // Wear, 2017. – V. 378–379. – P. 43–579.
7. Gadalog V. N., Salnikov V. G., Romanenko D. N., Shirin I. V. Durable Coatings for Cutters // Mechanical Engineering Technology 2011. – V. 7. – P. 26–28.
8. Vaulina O. Y., Ovechkin B. B., Papchenko A. V., Shvagruckova E. V. Research of functional properties of nitride ion-plasma coatings // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016. – V. 116(1) [012033] <https://doi.org/10.1088/1757-899X/116/1/012033>.
9. Blinkov I. V., Volkhonskii O. A., Anikin V. N. Nanostructured wear-resistant coatings based on multicomponent nitrides and produced by vacuum-arc ion-plasma deposition // Prot Met Phys Chem, 2012. Surf. 48 P. 649–655.
10. Tabakov V. P., Chikhranov A. V., Dolzhenko Y. A. Wear-resistant coatings based on niobium nitride // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020. – V. 709. [033096] [doi:10.1088/1757-899X/709/3/033096](https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033096).
11. Beresnev V. M., Sobol O. V., Grankin S. S., Nemchenko U. S., Novikov V. Yu., Bondar O.V., Belovol E.O., Maksakova O.V., Eskermesov D.K. Physical and mechanical properties of coatings (Ti-Zr-Nb)N obtained by the vacuum-arc evaporation method // Physics and chemistry of the material processing, 2015. – V. 4. – P. 50–58.



12. Горелик С. С. Рентгеноструктурный и электронно-оптический анализ металлов / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. – Москва : Металлургиздат, 1970. – 366 с.
13. Чихранов А. В. Прогнозирование работоспособности режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе оценки его теплонапряженного состояния и трещиностойкости / А. В. Чихранов, В. П. Табаков // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2017. – № 2 (41). – С. 223–229.
14. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н. Н. Зорев. – Москва : Машгиз, 1956. – 368 с.
15. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – Москва : Машиностроение, 1981. – 279 с.
16. Сайдахмедов Р. Х. Плазменные покрытия на основе нитридов и карбидов переходных металлов с регулируемой стехиометрией / Р. Х. Сайдахмедов. – Ташкент : Фан, 2005. – 226 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ДУГОВЫМ АДДИТИВНЫМ ИЗГОТОВЛЕНИЕМ ПОД РАЗЛИЧНЫМИ ФЛЮСАМИ**

**Трекин Григорий Евгеньевич,**

E-Mail: [trekin1963@yandex.ru](mailto:trekin1963@yandex.ru),

**Шевченко Олег Игоревич,**

E-Mail: [shevchenko\\_oleg@mail.ru](mailto:shevchenko_oleg@mail.ru),

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

**Аннотация.** (Проволочно) Дуговое аддитивное изготовление (ДАИ) (*wire arc additive manufacturing* (WAAM)) – энергично развивающееся направление производства. При использовании сварки под флюсом возможно наносить низкоуглеродистые низколегированные стали с высокой производительностью и свойствами, что позволит применить для производства деталей и инструмента. Микроструктура, твердость, распределение неметаллических включений и химический состав были исследованы для заготовок в состоянии после наплавки низколегированной проволокой под флюсами с различной основностью. Характеристики микроструктуры, установленные оптической металлографией, остаются практически неизменными для всех заготовок. Это феррито-мартенситная (бейнитная) структура, отличающаяся высокой дисперсностью. Исследование твердости показало формирование закаленного верхнего нанесенного слоя с повышенной твердостью и термоциклированных предыдущих слоев с более низкой твердостью. При нанесении слоя плавящейся проволокой под слоем флюса происходит выгорание углерода и незначительное насыщение металла кремнием и марганцем. Распределение неметаллических включений наиболее благоприятно при аддитивном формировании заготовки под нейтральным и основным флюсами. В результате проведено сравнительное исследование флюсов, позволяющее произвести его выбор применительно к аддитивному изготовлению заготовок из низколегированных сталей.

**Ключевые слова.** Аддитивное изготовление, наплавка под слоем флюса, проволочно-дуговое аддитивное изготовление, неметаллические включения, химический состав наплавленного металла, автотермоциклическая обработка, структура наплавленного металла, твердость, основность сварочного флюса, металлографическое исследование, дефекты наплавленного металла.

Аддитивные технологии позволяют получать заготовки с улучшенными свойствами и при сложной форме изделия обеспечивают экономическую целесообразность их применения [1]. Большинство обзоров не уделяют внимания низколегированным сталям и сварке под слоем флюса [2, 3], поскольку нет ее роботизированного варианта из-за необходимости удаления корки затвердевшего флюса. Работы, использующие ДАИ (WAAM) для заготовок из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, используют сварку в среде защитных газов плавящимся электродом [4]. Формирование структуры наплавленного металла при дуговом аддитивном изготовлении происходит при кристаллизации и последующем авто-термоциклическом воздействии от последнего нанесенного слоя на предыдущие [5, 6]. При этом образуется феррито-мартенситная (бейнитная) структура с различным соотношением феррита различной морфологии игольчатого, полигонального зернистого и др., а также обнаружена мартенсито-аустенитная составляющая. Геометрические размеры наращиваемой стенки определяются диаметром проволоки и режимом сварки и поверхностным натяжением расплава [7]. Химический состав также зависит от режима нанесения и обусловлен выгоранием или насыщением легирующих элементов при взаимодействии наплавляемого металла с защитной средой (газом, шлаком или расплавленным флюсом) [8]. Комплекс свойств металла, получаемого дуговым аддитивным изготовлением, достаточно привлекателен для использования в промышленности. Металл отличается достаточно высоким уровнем сопротивлению хрупкому разрушению [9].

Данная статья исследует влияние флюсов на формирование, структуру и свойства аддитивно изготовленных заготовок для расширения применения этого способа в промышленности.

Наплавка производилась на установке АДЦ -1250 СФ проволокой 30ХГСА (табл. 5) диаметром 3 мм на типовых режимах (табл. 1) под флюсами АН 348 А, ФСА ЧТА 650 -20/80 и UF -01 (табл. 2–4), количество проходов 51, в качестве основного металла использовалась планка из низкоуглеродистой стали толщиной 20 мм. Исследование химического состава наплавленного металла выполнено на приборе Q2 -ION, приготовление шлифов выполнялось по общепринятым методикам, травление в 6 % растворе азотной кислоты в этиловом спирте, металлографическое исследование и цифровая обработка изображений на микроскопе ZEISSAXIO Observer D1m, оснащенный аппаратно-программным комплексом THIXOMET, дюрOMETрическое исследование на твердомере DURA Jet по методу Роквелла.

Таблица 1  
Режимы наплавки

Ток, А	Напряжение, В	Скорость наплавки, м/ч	Скорость подачи проволоки, м/мин	Вылет электрода, мм	Время между слоями, мин
540	44	40	0,9	300	50–60

Таблица 2  
Химический состав (масс. %) и индекс основности ( $B_{\Phi}$ ) флюса АН-348А

SiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	CaF <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	P	$B_{\Phi}$
41–44	34–38	5–7,5	4–5,5	<6,5	<4,5	<2	<0,15	<0,12	0,75

Таблица 3  
Химический состав (масс. %) и индекс основности ( $B_{\Phi}$ ) флюса ФСА ЧТА 650–20/80

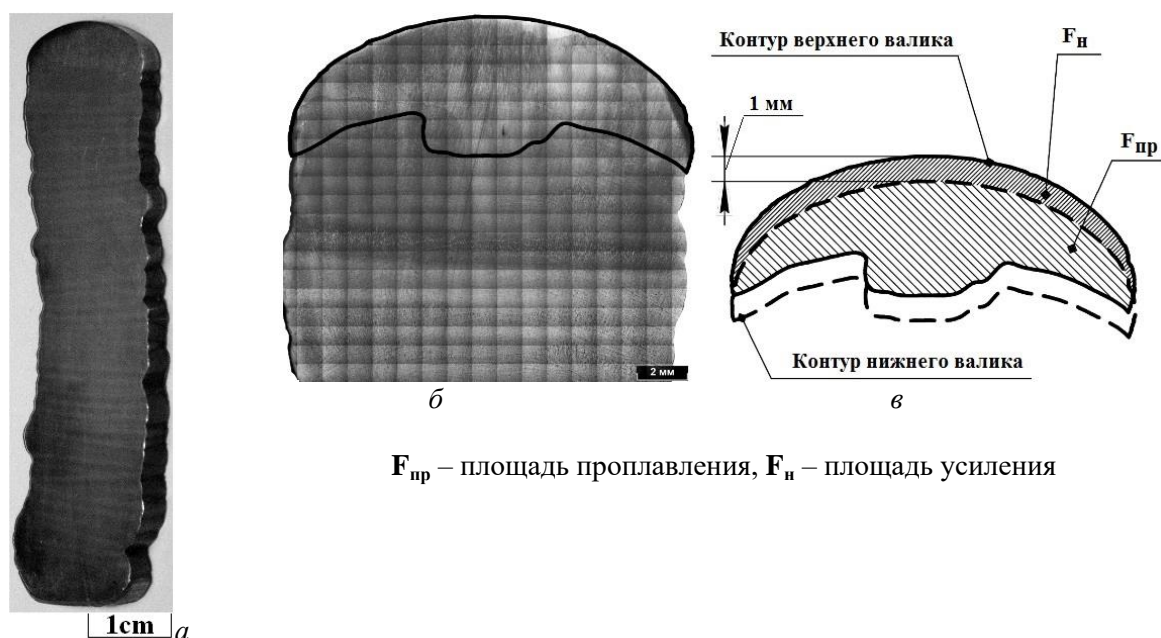
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + CaO+ MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	$B_{\Phi}$
>40	>20	>22	1,2

Таблица 4

Химический состав (масс. %) и индекс основности ( $B_{\phi}$ ) флюса UF-01

$CaO + MgO + CaF_2 + MnO$	$SiO_2$	$CaF_2$	$B_{\phi}$
>50	>20	>15	3,2

Формирование единичного наплавленного валика и отделимость шлаковой корки для всех флюсов отличное. Форма единичного валика месяцеобразная с неглубоким зубом проплавления в середине. После наплавки последовательно одного валика на другой формируется вертикальная стенка высотой 60–65 мм и шириной 14–18 мм без трещин. Из-за низкой вязкости жидкого металла под слоем флюса происходит приращение тонкого слоя толщиной около 1 мм. Предыдущий валик переплавляется на 74 % и от него остается тонкая прослойка толщиной также около 1 мм, которая попадает полностью в зону термического влияния и подвергается короткому термическому воздействию. При наплавке последующих слоев, происходит трехкратное переплавление и автотермоциклическая обработка (АТЦО) короткими нагревами с убывающей максимальной температурой от предплавления до низкого отпуска (рис. 1).



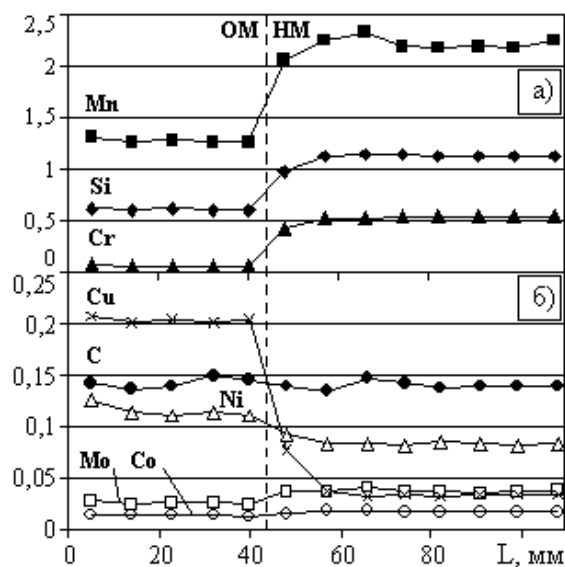
$F_{\text{пр}}$  – площадь проплавления,  $F_{\text{н}}$  – площадь усиления

Рис. 1 Формирование заготовки при аддитивном изготовлении наплавкой:  
*a* – поперечное сечение, *б* – верхняя часть,  
*в* – схема проплавления между слоями

Распределение химических элементов по высоте наплавленного металла равномерное (рис. 2). При наплавке под флюсами АН-348А и ФСА ЧТА 650 -20/80 остается около 40 % углерода, изначально содержащегося в проволоке и около 60 %; под флюсом UF -01. Наплавка под всеми флюсами приводит к незначительному насыщению наплавленного металла кремнием. Значительное насыщение марганцем происходит только под флюсами АН-348А и ФСА ЧТА 650 -20/80 на 1,5 % и 0,79 % соответственно для флюса UF -01 оно незначительно и составляет около 0,2 %. Выгорание хрома наблюдается только для флюса АН-348А (табл. 5). При наплавке под флюсами АН-348А и ФСА ЧТА 650 -20/80 формируется химический состав с наименьшим содержанием углерода и наибольшим кремния и марганца, а под флюсом UF -01 с наибольшим содержанием углерода и с наименьшим кремния и марганца, при малоизменяющемся содержании хрома.

Таблица 5  
Химический состав и твердость наплавочной проволоки и наплавленного металла (НМ)

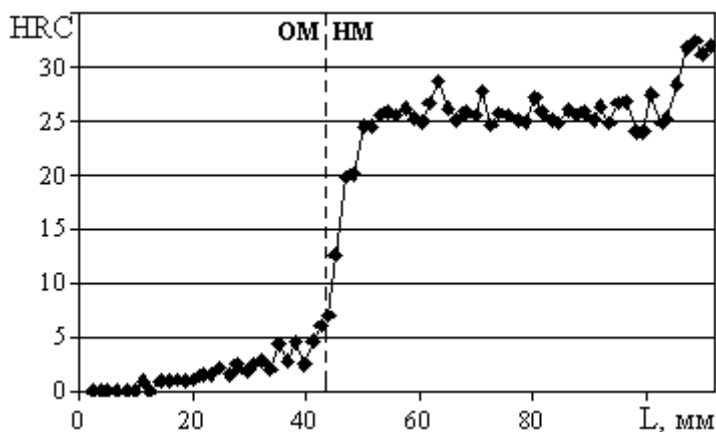
Флюс	Содержание элементов, масс. %				Твердость НМ, HRC после:	
	C	Si	Mn	Cr	наплавки	наплавки и АТЦО
Проволока 30ХГСА	0,34	0,97	0,81	0,75	–	–
АН-348 А	0,13	1,15	2,31	0,56	31	26
ФСА ЧТА 650 -20/80	0,14	1,20	1,59	0,72	31	21
UF - 01	0,21	1,04	1,02	0,79	26	19



ОМ – основной металл; НМ – наплавленный металл

Рис. 2 Распределение химического состава (масс. %) по высоте (L) основного и наплавленного металла (флюс АН-348А):  
а – в диапазоне до 2,5 %;  
б – в диапазоне до 0,25 %

Анализ распределения твердости по высоте наплавленного металла показал, что верхние валики имеют более высокую на 16-32 % твердость по сравнению с низлежащими, прошедшими автотермоциклическую обработку (рис. 3, табл. 5).



ОМ – наплавленный металл;  
НМ – наплавленный металл

Рис. 3 Распределение твердости (HRC) по высоте (L) основного и наплавленного металла, (флюс АН-348А)

Анализ структуры выявил в верхних валиках мартенситно-ферритную структуру с небольшой объемной долей феррита для всех исследованных вариантов наплавки, что и обусловило более высокую твердость верхней части наплавленного образца. В низлежащих областях наплавки возросла доля феррита и произошло, вероятнее всего, образование дисперсного перлита после высокотемпературного термоциклического воздействия. Наибольшей дисперсностью обладает структура металла наплавленного под флюсом ФСА ЧТА 650 -20/80 (рис. 4).

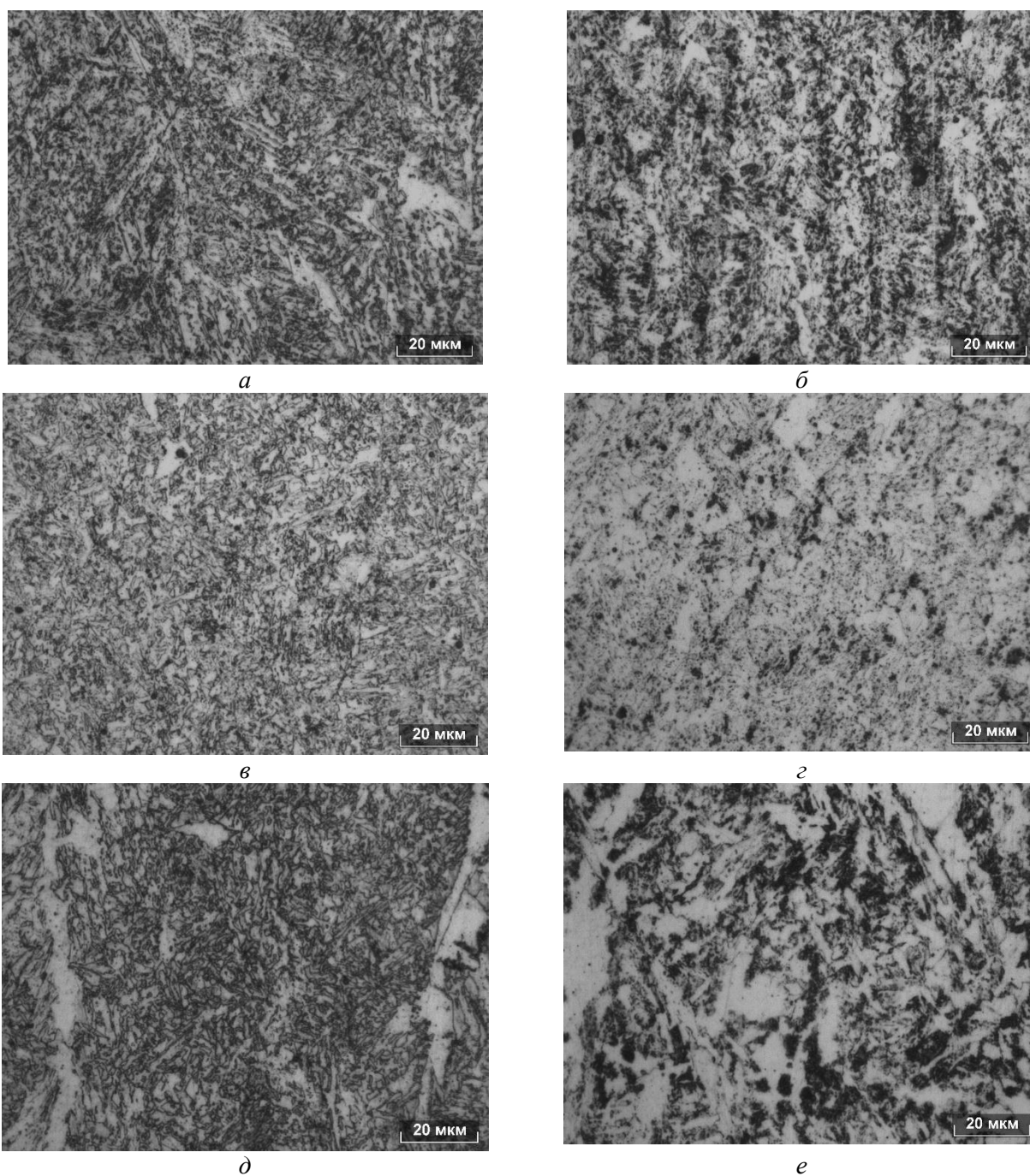


Рис. 4 Микроструктура наплавленного металла:  
 наплавка под флюсом: *а, б* - АН-348А; *в, г* - ФСА ЧТА 650 -20/80; *д, е* - UF -01  
*а, в, д* - после наплавки; *б, г, е* - после наплавки и автотермоциклического воздействия

Оценка неметаллических включений производилась на маленьком ( $\times 50$ ) и большом ( $\times 1000$ ) увеличении. Первые характеризуют загрязненность относительно крупными включениями, которые образуются преимущественно на этапе взаимодействия гидродинамических течений металла и шлака в сварочной ванне. Вторые зарождаются в жидком и твердом состоянии, а растут или растворяются преимущественно в твердом состоянии. Форма частиц преимущественно сферическая (рис. 5).

Наибольшая объемная доля включений при наплавке под флюсом АН 348-А связана с высокой насыщенностью металла шва кислородом. Для флюсов ФСА ЧТА 650 -20/80 и UF -01 эта величина меньше (рис. 6). Высокая доля крупных включений, попавших в сечение шлифа размером от 30 до 910 мкм<sup>2</sup>, является вероятнее всего более затрудненных условий всплывания неметаллических включений при

использованных режимах для флюсов АН 348-А и ФСА ЧТА 650 -20/80 по сравнению с флюсом UF – 01 (рис. 7 а, в, д). При большом увеличении наибольшая доля мелких до  $1 \text{ мкм}^2$  включений для флюсов ФСА ЧТА 650 -20/80 и UF – 01 и значительная доля включений размерами от 1,5 до  $18 \text{ мкм}^2$  (рис. 7 б, г, е) связана с различиями в температуре плавления флюсов. Интервал плавления сварочных флюсов сильно влияет на количество и вид микрошлаковых включений остающихся в металле шва. Компоненты сварочного флюса, имеющие температуру затвердевания более высокую, чем металл шва, присутствуют в жидком металле сварочной ванны в виде мельчайших сферических частиц и успевают удалиться из ванны до ее кристаллизации. Кислые и нейтральные флюсы имеют температуру плавления около  $1350\text{--}1450 \text{ }^\circ\text{C}$ , поэтому количество микрошлаковых частиц в металле шва, больше чем при использовании основных флюсов.

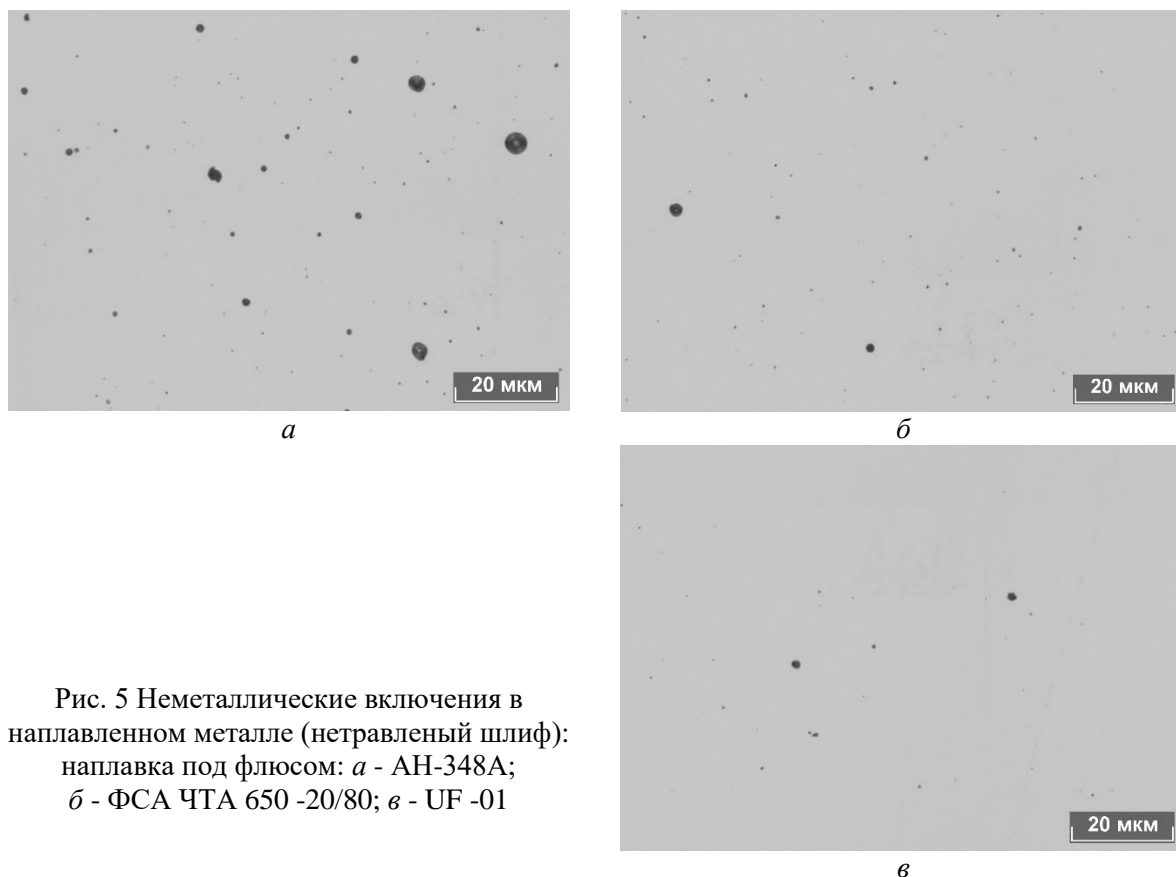


Рис. 5 Неметаллические включения в наплавленном металле (нетравленный шлиф):  
наплавка под флюсом: а - АН-348А;  
б - ФСА ЧТА 650 -20/80; в - UF -01

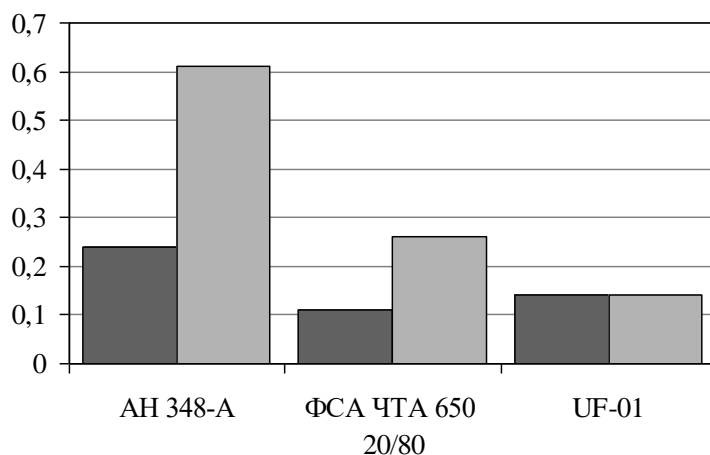


Рис. 6 Доля неметаллических включений (об %) в наплавленном металле: при увеличении:  
■  $\times 50$   
□  $\times 1000$

Формирование контура проплавления не совсем благоприятно при наплавке под всеми рассмотренными флюсами, поскольку формируется зуб проплавления, что может повысить вероятность образования межслойных трещин. Поэтому необходимо добиться

контура проплавления приближающегося к прямой линии без центрального участка глубокого проплавления. Этого можно добиться за счет применения электромагнитных воздействий, наплавки модулированным током, иных технологических воздействий и изменения режимов наплавки.

Образующаяся структура способна проявить высокие свойства, поскольку металл переплавляется втрое и из-за тонкого остающегося слоя подвергается практически однородному последующему автотермическому воздействию, что в сочетании с контролем температуры между слоями приводит к высокой однородности структуры, что и подтверждается малым разбросом твердости и химического состава.

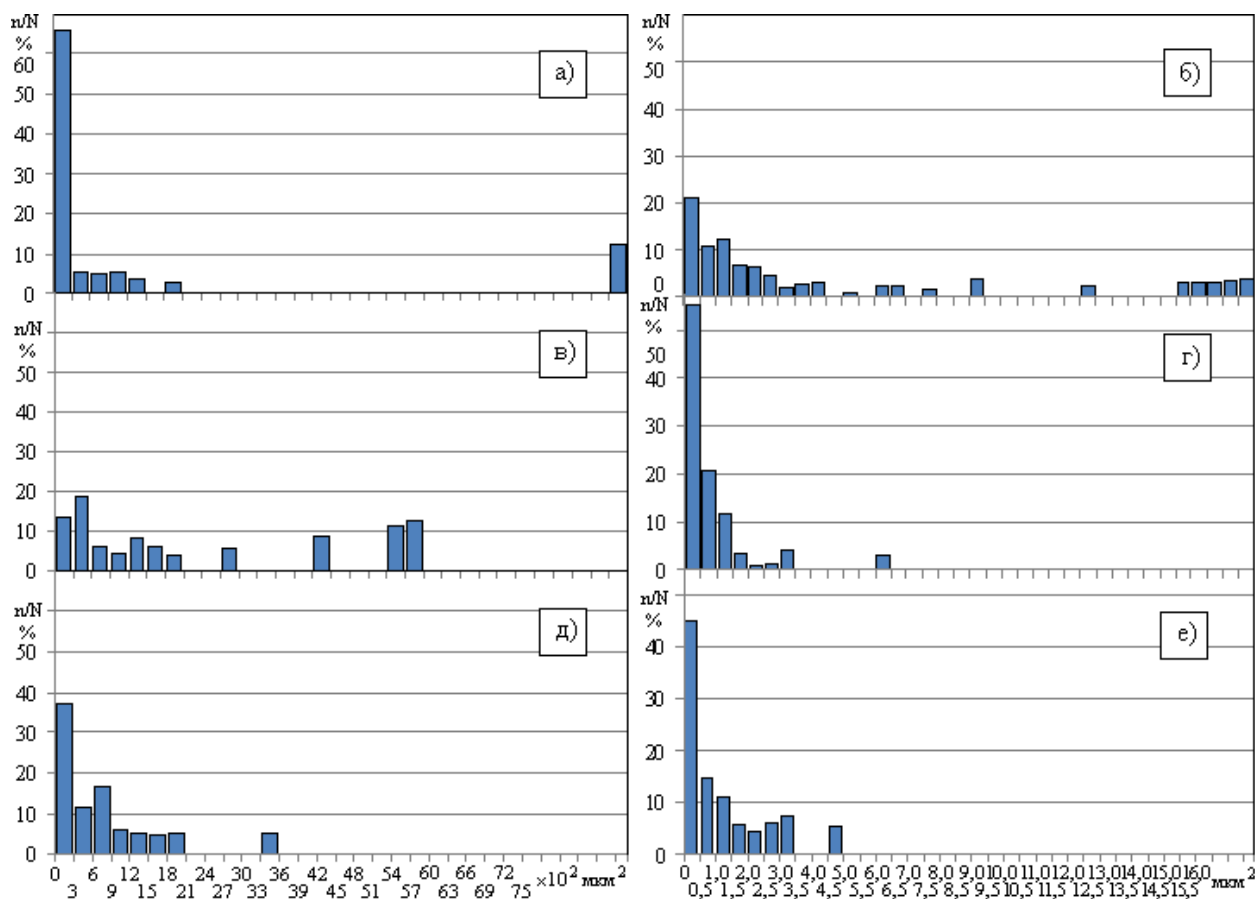


Рис. 7 Гистограммы распределения неметаллических включений по площади в наплавленном металле: наплавка под флюсом: а, б - АН-348А; в, г - ФСА ЧТА 650 -20/80; д, е - UF -01 при увеличении: а, в, д -  $\times 50$ ; б, г, е -  $\times 1000$

Участки начального выравнивания химического состава и конечного не прошедшего полную автотермоциклическую обработку примерно одинаковы и составляют 10–12 слоев. В сочетании с легированием проволокой как в работе [10], данный способ позволит получать заготовки заданного состава и структуры.

Доля относительно крупных включений площадью более  $300 \mu\text{m}^2$ , если принять частицы сферическими, то размером более  $19,5 \mu\text{m}$ , составляет 0,079 для АН 348А; 0,095 для ФСА ЧТА 650 -20/80 и 0,074 для UF-01. Это показывает, что уровень содержания условно крупных неметаллических включений несколько больший для ФСА ЧТА 650 -20/80, но в целом значения одного порядка, поэтому выделить лучший флюс по этому параметру затруднительно. Анализ размеров частиц выявленных на большом увеличении показывает, что их размеры меньше опасного размера в 10–20  $\mu\text{m}$  ( $38,5\text{--}78,5 \mu\text{m}^2$ ) определенного в работах [11, 12] для всех использованных флюсов, но их плотность в металле, наплавленном под флюсом АН 348А в разы больше, чем при

применении двух других флюсов. Наиболее благоприятной принято считать дисперсную структуру с приемлемым количеством неметаллических включений этому критерию наибольшей степени подходит флюс ФСА ЧТА 650 -20/80.

Таким образом, при аддитивном изготовлении заготовки наплавкой под флюсом проволокой диаметром 3 мм на типовых режимах формируется стенка толщиной 14-18 мм с высокой однородностью и дисперсностью структуры, за исключением начального и конечного участков шириной примерно такой же как и толщина стенки. При использовании проволоки 30ХГСА под слоем флюсов АН-348А и ФСА ЧТА 650 -20/80 формируется химический состав с наименьшим содержанием углерода и наибольшим кремния и марганца, а под флюсом UF -01 с наибольшим содержанием углерода и с наименьшим кремния и марганца, при малоизменяющемся содержании хрома. Наплавленный металл имеет мартенситно-ферритную структуру после наплавки, которая обуславливает более высокую твердость верхних валиков. В нижерасположенных слоях наплавленного металла, формируется твердость от 19 до 26 HRC, которая обусловленной ростом доли феррита, образованием дисперсного перлита и отпуском мартенсита из-за автотермоциклической обработки. Наибольшую загрязненность неметаллическими включениями имеет металл, наплавленный под флюсом АН-348А наименьшую под UF-01. По результатам исследований к применению можно рекомендовать флюс ФСА ЧТА 650 -20/80. Так же, необходимо усовершенствовать технологию наплавки, чтобы убрать зуб проплавления в центре валика.

#### Библиографический список

1. C. R. Cunningham, S. Wikshaland, F. Xu, N. Kemakolam, A. Shokrani, V. Dhokia, S.T. Newman. Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing. *Procedia Manufacturing* vol. 11, (2017), p. 650–657.
2. S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove. *Wire + Arc Additive Manufacturing. Materials Science and Technology*, 2016, vol. 32, № 7, p. 641-647.
3. Binta Wu, Zengxi Pan, Donghong Ding, Dominic Cuiuri, Huijun Li, Jing Xu, Jonn Norrish. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 35, (2018), p. 127–139.
4. Tiago A. Rodrigues, V. Duarte, Julian A. Avila, Telmo G. Santos, R.M. Miranda, J.P. Oliveira. Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, vol. 27, (2019), p. 440–450.
5. Jun Xiong, Rong Li, Yangyang Lei, Hui Chen. Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Tech.*, 251 (2018) 12–19.
6. Donghong Ding, Zengxi Pan, Dominic Cuiuri, Huijun Li, Stephen van Duin, Nathan Larkin. Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 39 (2016) 32–42.
7. Sergio Rios, Paul A. Colegrove, Filomeno Martina, Stewart W. Williams. Analytical process model for wire + arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21 (2018) 651–657.
8. P. Kanjilal, T. K. Pal, S. K. Majumdar. Combined effect of flux and welding parameters on chemical composition and mechanical properties of submerged arc weld metal. *Journal of Materials Processing Technology* 171 (2006) 223–231.
9. Benjamin Shassere, Andrzej Nycz, Mark W. Noakes, Christopher Masuo, Niyanth Sridharan. Correlation of Microstructure and Mechanical Properties of Metal Big Area Additive Manufacturing. *Appl. Sci.* 2019, 9, 787.
10. Chen Shen, Zengxi Pan, Yan Ma, Dominic Cuiuri, Huijun Li. Fabrication iron-rich Fe-Al intermetallics using the wire-arc additive manufacturing process. *Additive Manufacturing* 7 (2015) 20–26.



11. Кривоносова Е. А. Трансформация неметаллических включений в сталях под действием плазменного источника нагрева / Е. А. Кривоносова, Д. С. Белинин // ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – Т. 19. – № 1. – 2017. – С. 58–77.

12. Кривоносова Е. А. Особенности влияния неметаллических фаз на развитие деформации наплавленных слоев / Е. А. Кривоносова // ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – Т. 18. – № 1. – 2016. – С. 189–204.

## РАЗРУШЕНИЕ ЭЛЕКТРО-ИСКРОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ НАГРЕВЕ ПОДЛОЖКИ ПРОХОДЯЩИМ ТОКОМ

Трекин Григорий Евгеньевич,

E-Mail: [trekin1963@yandex.ru](mailto:trekin1963@yandex.ru),

Шевченко Олег Игоревич,

E-Mail: [shevchenko\\_oleg@mail.ru](mailto:shevchenko_oleg@mail.ru),

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

**Аннотация.** Нанесение электроискрового покрытия, слоя – распространенный способ упрочнения поверхностей деталей машин и механизмов. В большинстве случаев материалом покрытия являются твердые материалы для повышения износостойкости или других свойств. В данной работе предполагается применение электроискрового нанесения покрытия для микролегирования сварных швов, нанося его на поверхность основного металла или предыдущих слоев сварного шва, в этом случае оно полностью переплавляется. Перед переплавлением происходит интенсивный нагрев и разрушение (преобразование) в результате которого меняется химический состав, попадающий в переплавку. Поэтому в эксперименте использовался скоростной высокотемпературный нагрев проходящим током и быстрое охлаждение в воде для фиксации состояния поверхностного слоя. Исследовались и анализировались микроструктура, микротвердость и распределение химических элементов по толщине электроискрового измененного слоя, после нанесения алюминия и титана. Показано, что порывы разрушаются в интервале температур 500–650 °С с образованием жидкой фазы из-за наличия у обоих металлов эвтектик в этом интервале температур. Большая часть титана и алюминия при этом окисляются, защищая поверхность от этого основной металл. Установлено, что после электроискрового легирования обоими электродами формируется твердый слой с трещинами и зоной термического влияния под ним. Для алюминиевого покрытия, после высокотемпературного нагрева и охлаждения образуется более толстый белый слой, с микротвердостью на уровне основного металла, а на некотором удалении от него тонкий слой со структурой частичного обезуглероживания. На месте титанового покрытия выявляются участки плавления, более твердые по сравнению с основным металлом и имеющие дендритную структуру, за которой следует тонкая зона полного обезуглероживания и достаточно протяженная зона частичного обезуглероживания.

**Ключевые слова.** Электроискровое нанесение, электроискровое нанесение алюминия, электроискровое нанесение титана, микроструктура, микроструктура нанесенного слоя, металлографическое исследование, нагрев до высоких температур, микротвердость, дюрOMETрическое исследование нанесенного слоя, микроструктура поверхностного слоя металла.

Нанесение металла на поверхность при электроискровом разряде (электроискровое нанесение – ЭИН (*electro-sparkdeposition* – ESD)) происходит в результате эффекта катодного распыления. На аноде при этом образуется лунка расплава из-за вытеснения его давлением искрового разряда. На этот расплавленный участок поступает также, вероятнее

всего жидкая капля, отделившаяся от анода. При высокой частоте искровых разрядов зоны плавления от каждого разряда перекрываются, и образуется достаточно сплошное покрытие с трещинами, поскольку скорости охлаждения очень велики. В зоне под нанесенным слоем образуется аналог сварочной зоны термического влияния. Интенсивное испарение металла из зоны искрового разряда приводит к разбрызгиванию и потерям электродного металла [1–3]. Наибольшее распространение для нанесения электроискровым способом получили твердые износостойкие сплавы [4, 5]. Слои, нанесенные другими материалами, используют как окалино- коррозионностойкие и др. [6–8]. Алюминий и титан использовали как микролегирующий слой для последующей переплавки, поскольку толщина слоя порядка десятых долей миллиметра и содержит трещины. Влияние микролегирования алюминием и титаном благотворно влияет на свойства наплавленного металла [9], поэтому в данной работе исследовались изменения поверхностного слоя после электроискрового нанесения и высокотемпературном нагреве перед расплавлением.

Нанесение электроискрового слоя выполнялось на воздухе с использованием установки, кафедры металлургической технологии НТИ (филиал) УрФУ, параметры режима позволяли получить сплошное покрытие (табл. 1).

Таблица 1  
Режимы электроискрового нанесения

Электрод	$d_{эл}, мм$	$I_{ср}, А$	$U_{ср}, В$	$E_{1имп}, кДж$	$\nu_{имп}, Гц$	$\omega_{эл}, об/мин$	$V_{лег}, см/с$
Al	40	18–22	75–80	4,85	300	50	6
Ti	20						

$d_{эл}$  – диаметр электрода;  $I_{ср}$  – средний ток;  $U_{ср}$  – среднее напряжение;  $E_{1имп}$  – энергия единичного импульса;  $\nu_{имп}$  – частота следования импульсов;  $\omega_{эл}$  – частота вращения электрода;  $V_{лег}$  – скорость перемещения электрода относительно заготовки.

Подложкой служили планки из стали 20 (табл. 2) размер сечения  $3 \times 25$  мм, длина 250 мм. Электроискровой слой был нанесен по всей планке.

Таблица 2  
Химический состав стали 20

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	As
0,17–0,24	0,3–0,65	0,17–0,37	0,25	0,04	не более			
					0,035	0,25	0,25	0,08

Металлография выполнялась на микроскопе *Zeiss ObserverD1m* под управлением программы *Thixomet* при увеличении от 200 до 1000 крат. Травление производилось реактивом 5 % раствор азотной кислоты в спирте с выдержкой 20 с. ДюрOMETрическое исследование проводилось на установке *Future TechFM - 300* пирамидой Виккерса при нагрузке 50 г с выдержкой под нагрузкой 50 с. Обработка полученных данных выполнялась в программах: *Excel* и *MathCAD*. Содержание химических элементов по толщине нанесенного слоя производили с помощью электронного микроскопа *Phenom PRO*.

Температуру измеряли с использованием хромель-алюмелевой термопары. Запись термического цикла выполняли при помощи усилителя *Zet 410* и аналогоцифрового преобразователя *Zet 210*. Циклограмму тока и напряжения фиксировали на этой же установке, дополненной трансформаторами тока и платами обработки сигнала.

Разогрев образца выполняли проходящим переменным током под флюсами АН 348 - А и ФСА ЧТ А - 650 - 20/80 (табл. 3, 4) с использованием сварочного трансформатора ТСД – 1000 – 3. Параметры нагрева обеспечивали расплавление флюса, путем разогрева заготовки выше температуры плавления флюса. Охлаждение выполнялось в емкости с водой (рис. 1).

Таблица 3  
Химический состав флюса АН-348-А, масс %

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CaO	MgO	CaF <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	P
40–44	≤ 6	31–38	≤ 12	≤ 7	3–6	0,5–2,0	≤ 0,12

Таблица 4  
Химический состав флюса ФСА ЧТ А 650-20/80, масс %

Сумма оксидов	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + CaO + MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>
	не менее		
%	40	20	22

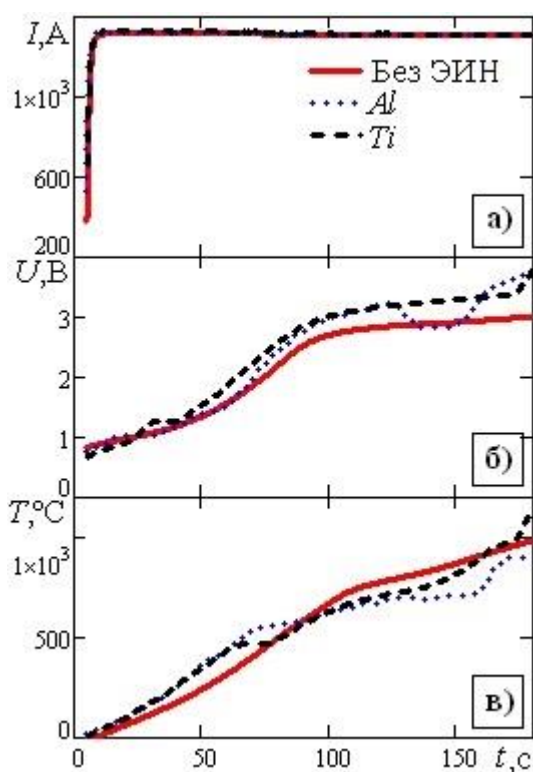


Рис. 1 Изменение тока (а), напряжения (б) и температуры (в) в процессе электротермического нагрева под флюсом АН 348 – А.

Символы химических элементов показывают материал электрода при ЭИН

пор и включений. На некоторой глубине от белой прослойки наблюдается тонкий участок частичного обезуглероживания, что заметно по более толстой ферритной оторочке вокруг зерен с закаленной структурой (рис. 2, в, д, 3, в). В образцах с титановым покрытием это участок неравномерной толщины с зонами плавления, с зернами дендритной морфологии. За секторами плавления выявляются участки полного и частичного обезуглероживания, первый узкий около 200 мкм, второй размером приблизительно 1 мм (рис. 2, г, в, 3, г).

После непродолжительного электротермического нагрева, диффузионно алюминий успевает распространиться на глубину около 68 мкм и его максимальное содержание в поверхностных участках 6–12 ат. % (рис. 4, в). Титан проникает не равномерно, на участках плавления от 2 до 5 ат. % с всплесками до 20 ат. % (рис. 4, а, б), на других участках только пики около 20 ат. %.

Равновесные диаграммы состояния алюминий-железо и титан-железо [10], позволяют заключить, что в электроискровом нанесенном слое возможно образование интерметаллидов, поскольку они выявлены при использовании этих металлов в качестве электродов [11], это также подтверждается высокой твердостью металла покрытия и наличием в нем трещин. Видимо нельзя упускать возможное образование нитридов

В микроструктуре поверхностного нанесенного слоя после электроискрового нанесения выявлен светло-белый слой с высокой твердостью и большим числом трещин. В слое, нанесенном алюминиевым электродом, поверхность достаточно неровная, для слоя, нанесенного титановым электродом, более ровная (рис. 2 а, б, 3, а, б). Высота нанесенного слоя для алюминиевого электрода 40–80 мкм, а для титанового – около 30 мкм. В более глубоких слоях за првнесенным слоем располагается зона термического влияния с ферритной структурой, размер которой одинаков для всех электродов, примерно 100 мкм (рис. 2 а, б).

После джоулева нагрева и охлаждения наблюдается, что слой металла с трещинами полностью исчезает и на его месте выявляется белый слой с низкими показателями твердости. Для покрытия, выполненного алюминиевым электродом под обоими флюсами, это плотная прослойка с относительно ровными границами и небольшим числом

и оксидов, поскольку в процесс электроискрового нанесения выполнялся без дополнительной газовой защиты. Достаточно высока вероятность переноса в покрытие небольших объемов относительно малоразбавленного материала электрода. Например, содержание титана может достигать в пиковых значениях около 72 ат. % (рис. 5, а). При повышении температуры взаимодействие со стороны стальной подложки развивается по диффузионному пути: со стороны железа для обоих материалов электродов это  $\alpha$  - твердый раствор с  $\gamma$  - областью в выше 900 °С, со стороны алюминия – эвтектика 652 °С, со стороны титана тоже эвтектика при 590 °С. Из-за этого при нагревании электроискровых нанесенных слоев должна образоваться эвтектическая жидкая фаза, что мы и видим: алюминиевый слой становится относительно ровным, а в титановом образуются сегментные участки с дендритной структурой. Это подтверждается рис. 1, в, где четко выявляются перегибы кривых нагрева в интервале 500–650 °С для планок с электроискровым нанесенным слоем.

Дальнейшее повышение температуры для алюминиевого электроискрового слоя приводит к развитию взаимодействия по диффузионному механизму, со стороны нагреваемой поверхности – окисление, со стороны подложки – локальное плавление и растворение, из-за этого при сварочном переплавлении в металл шва попадает пленка окиси алюминия и прослойка твердого раствора с содержанием алюминия приблизительно 5 ат. %. В титановом покрытии дальнейший нагрев приводит вероятно к взаимодействию углерода и титана, образованием карбида, о чем говорит возникновение обезуглероженных зон после электротермического нагрева. Среднее содержание титана в оставшемся слое составляет приблизительно 7 ат. %. Если принять, что толщина слоя, содержащего титан, примерно одинакова до и после высокотемпературного нагрева, то в основной металл переходит около 10 % титана, т. е. большая часть титана переходит в расплав в виде окисла.

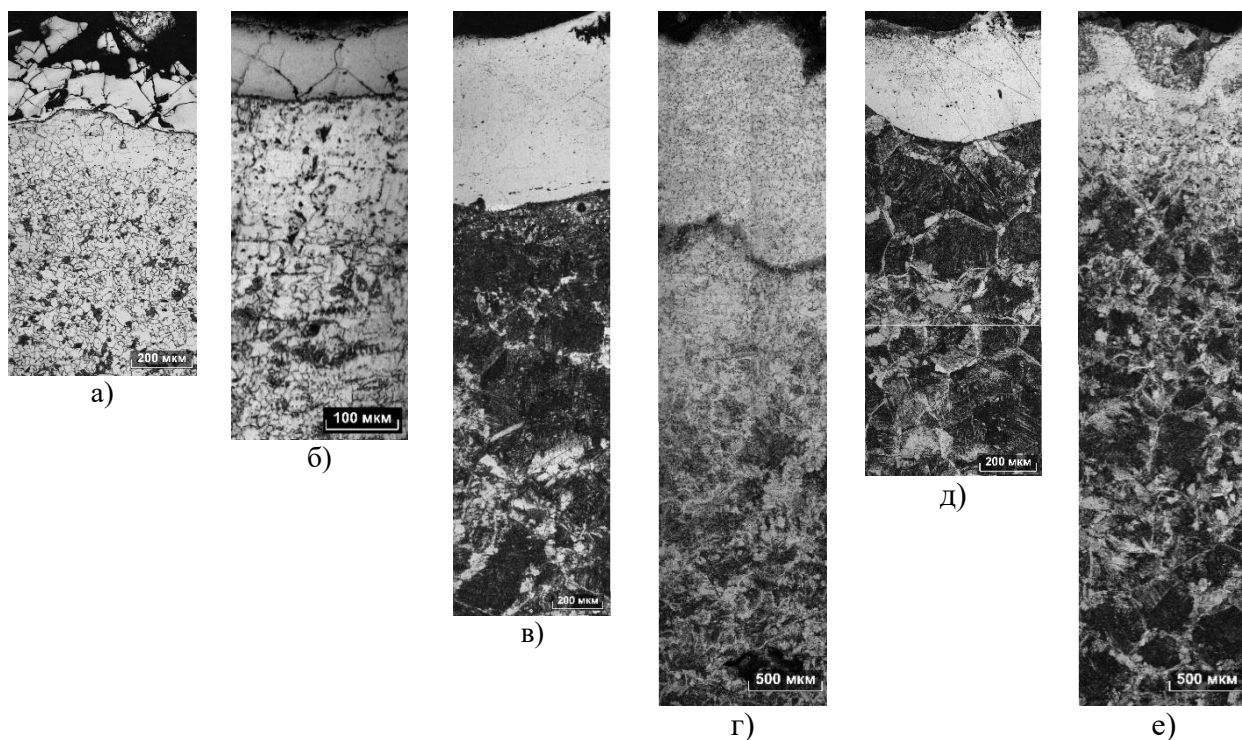


Рис. 2 Микроструктура поверхностного слоя стали 20 после ЭИН и электротермического нагрева: а, б – ЭИН; в, г – ЭИН и электротермического нагрева под флюсом ФСА ЧТ А - 650 - 20/80; д, е – ЭИН и электротермического нагрева под флюсом АН 348 – А; а, б, в – алюминиевым электродом; г, д, е – титановым электродом

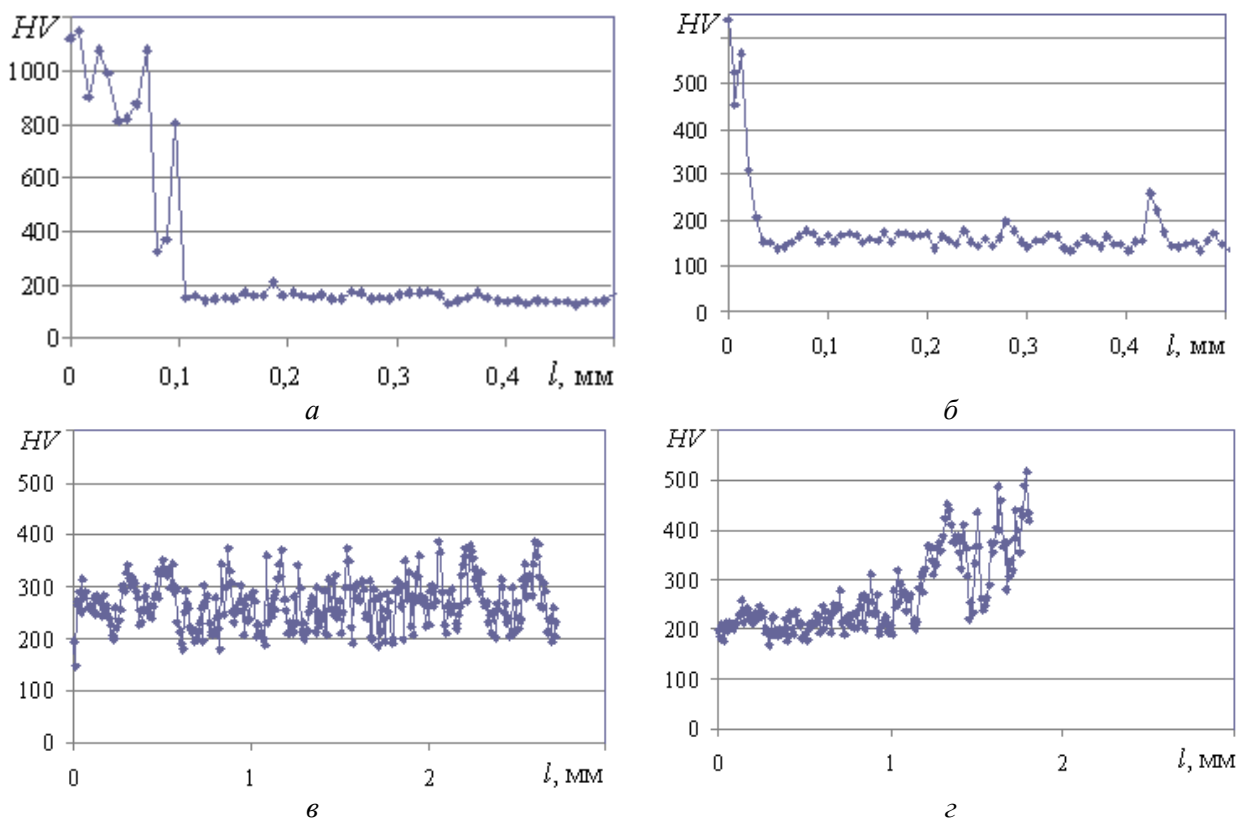


Рис. 3 Распределение микротвердости ( $HV$ ) по глубине измененного слоя ( $l$ ) *a, в* – алюминиевый электрод; *б, г* – титановый электрод; *a, б* – после ЭИН; *в, г* – после ЭИН и нагрева под флюсом ФСА ЧТ А – 650–20/80

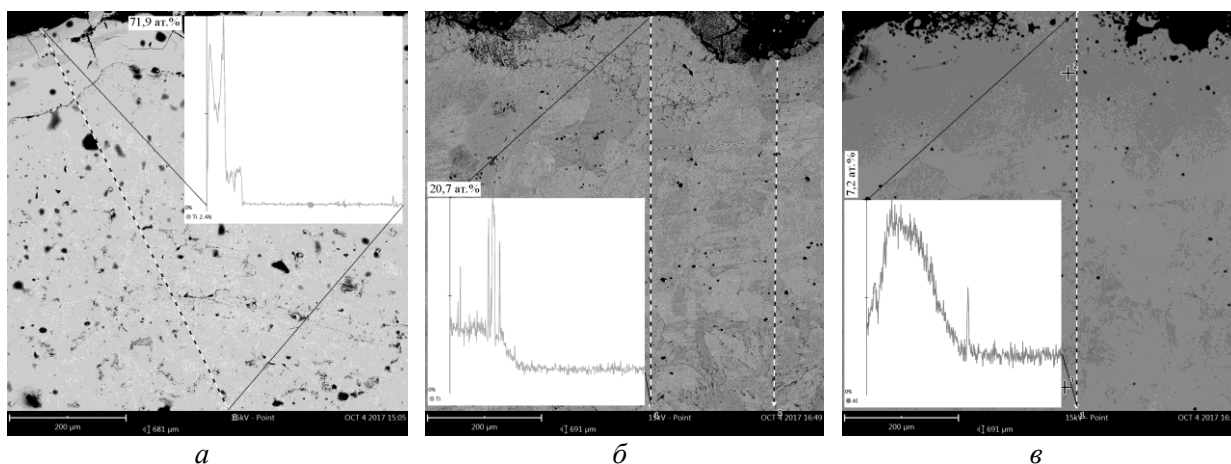


Рис. 4 Распределение титана и алюминия по глубине измененного слоя: *a, б* – титановый электрод; *в* – алюминиевый электрод; *a* – после ЭИН; *б, в* – после ЭИН и электротермического воздействия

Из-за того, что структурные изменения происходят до плавления флюсов, их влияние на деградацию покрытия незначительно, а результаты различаются мало от марки флюса.

Таким образом, во время электротермического джоулевого нагрева электроискровых слоев, выполненных алюминиевым и титановым электродами, выявлено плавление поверхностных слоев с диффузионным перераспределением элементов. Вместо алюминиевого электроискрового покрытия образуется белый низколегированный слой с тонким участком частичного обезуглероживания. Вместо титанового электроискрового слоя можно увидеть сегментовидные участки локального расплавления, за которыми располагается тонкая зона полного и протяженная около 1 мм частичного

обезуглероживания. Наибольшая доля нанесенного на поверхность титана и алюминия подвергается окислению, и меньшая часть (не более 10 %) остается после высокотемпературного электротермического воздействия в остатках нанесенного слоя.

#### Библиографический список

1. V. I. Ivanov, F. Kh. Burumkulov, A. D. Verkhoturov, P. S. Gordiyenko, Ye. S. Panin, L. A. Konevsov. Formation of the surface layer on a low-carbon steel in electrospark treatment. *Welding International*, Vol. 27, 2013, Issue 11, pp. 903–6.
2. Orhan Sahin and Alexandre V. Ribalko (2011). *Electrospark Deposition: Mass Transfer, Mass Transfer – Advanced Aspects*, Dr. Hironori Nakajima (Ed.), ISBN: 978-953-307-636-2, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/mass-transfer-advanced-aspects/electrospark-deposition-mass-transfer>.
3. Amin D. Thamer, Mohammed H. Hafiz, Baha S. Mahdi. Mechanism of Building-Up Deposited Layer during Electro-Spark Deposition. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 2012, 2, 258–63.
4. A. Çakir, M. S. Yilmaz, A. Ribalko, K. Korkmaz. A Study on Modification of Micro-Alloy Steel Surfaces with Different Hard Materials Via Electro-Spark Deposition Method. *Proceedings of the 4th International Congress APMAS2014*, April 24–27, 2014, Fethiye, Turkey. *ACTA PHYSICA POLONICA A*, Vol. 127 (2015), № 4, pp. 1410–3.
5. S. V. Nikolenko, A. D. Verkhoturov, N. A. Syui, E. N. Kuz'michev. Influence of electrospark discharge parameters on roughness and microabrasive wear of steel 45 surface after ESA by TiC-based electrodes. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol. 52, Issue 4, July 2016, pp. 342–9.
6. M. I. Jamnapara, Stefano Frangini, D.U. Avtani, V.S. Nayak, N.I. Chauhan, G. Jhala, S. Mukherjee, A.S. Khanna. Microstructural studies of electrospark deposited aluminide coatings on 9Cr steels. *Surface Engineering*, Vol. 28, 2012, pp. 700–4.
7. M. I. Jamnapara, Stefano Frangini, J. Alphosa, N. I. Chauhan, S. Mukherjee. Comparative analysis of insulating properties of plasma and thermally grown alumina films on electrosparkaluminide coated 9Cr steels. *Surface & Coatings Technology* 266 (2015) 146–50.
8. A. V. Kozyr, L. A. Konevtsov, S. V. Konovalov, S. V. Kovalenko, V. I. Ivashenko. Research of heat resistance of the multilayer coating after electro-spark alloying of C45 steel Cr-Ni alloys. *LettersonMaterials*, Vol. 8, Issue 2, May 2018, pp. 140–5.
9. Трекин Г. Е. Влияние алюминиевого электроискрового технологического подслоя и температуры отпуска на структуру и свойства низкоуглеродистого, низколегированного сварного шва / Трекин Г. Е., Шевченко О. И. // *Вестник ПНИПУ Машиностроение, материаловедение*. Т. 17. – № 1. – 2015. – С. 112–118.
10. (1986) *Binary Alloy Phase Diagrams*. ed. by T. B. Massalski, J. L. Murray, L. H. Bennett and H. Baker, ASM, Metals Park.
11. S. A. Pyachin, A. A. Burkov. Formation of intermetallic coatings by electrospark deposition of titanium and aluminum on a steel substrate. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 51:2, (2015), pp. 118–24.

## НАПРАВЛЕНИЯ ЛИКВИДАЦИИ ОТВАЛОВ ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

**Хазин Марк Леонтьевич,**

E-Mail: [Khasin@ursmu.ru](mailto:Khasin@ursmu.ru),

**Апакашев Рафаил Абдрахманович,**

E-Mail: [parknedra@yandex.com](mailto:parknedra@yandex.com),

Уральский государственный горный университет,

г. Екатеринбург,

**Тарасов Петр Иванович,**

E-Mail: [tp6005@mail.ru](mailto:tp6005@mail.ru),

ООО «Перспектива-М»,

г. Екатеринбург

**Аннотация.** Количество твердых отходов накопленных за время работы ОАО «Качканарский ГОК «Ванадий» составляет более 1 млрд т, которые складываются в отвалы и хвостохранилища, значительно изменяя естественную ландшафтную структуру. Вскрышные и вмещающие породы добываются из недр вместе с полезными ископаемыми и лежат мертвым грузом в виде отвалов и терриконов. Большое количество горных пород, накопленных в отвалах и хвостах обогащения, создает серьезные экологические и экономические проблемы в горнопромышленных районах. Эти породы относятся к V классу опасности отходов, т. е. считаются практически неопасными. Стратегическим направлением ликвидации твердых горнопромышленных отходов может быть их использование при строительстве автомобильных и железных дорог. Ликвидация отвалов на борту карьеров позволит сократить расстояние транспортирования и высоту подъема горной массы, увеличить эффективную глубину разработки месторождения.

**Ключевые слова.** Экология, пустые породы, отвалы, Урал, строительство автодорог, железная дорога.

ОАО «Качканарский ГОК «Ванадий» (КГОК) является одним из крупнейших горных предприятий России и с 1963 г. разрабатывает Гусевогорское месторождение титаномагнетитовых железных руд. КГОК «Ванадий» находится в зоне тайги, состоящей из хвойных, лиственных и смешанных лесов с хорошо развитой экосистемой лугов, расположенной на границе Западно-Сибирской равнины и Среднего Урала.

Добыча руды осуществляется из трех карьеров Качканарского ГОКа с дальнейшей ее переработкой. Из основных видов техногенного воздействия на окружающую среду можно отметить: механическое нарушение земной поверхности и складирование вскрышных пород при проведении горных работ; выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от горных машин и оборудования; химическое загрязнение от размещенных в отвалах вскрышных пород и хвостов мокрой магнитной сепарации; сбросы сточных вод в водный бассейн и нарушение гидрологического режима в результате откачек подземных вод в бортах карьера.

Достигнутая глубина ведения горных работ составляет 125 м при проектной глубине – 300 м. Вскрытие ведется по комбинированной схеме: нагорная часть – обособленными заездами с вывозом руды автотранспортом; нижние горизонты – внутрикарьерными спирально-тупиковыми съездами и доставкой руды от забоя до обогащательной фабрики. Система разработки – транспортная с внешними отвалами (рис. 1).

Технология обогащения включает в себя дробление и измельчение на мельницах, сухую и мокрую магнитную сепарацию, обезвоживание концентрата. Комбинат работает в замкнутом цикле водопотребления с оборотной и последовательно используемой водой. Количество твердых отходов составляет до 55 млн т, а газообразных (пыль, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) – до 83,9 тыс. т [1].

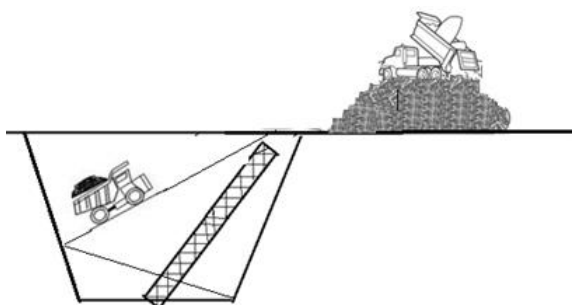


Рис. 1 Существующая технология

За время разработки месторождения накоплено более 1 млрд т твердых отходов. При этом площадь нарушенных земель составила 3345 га: из них занято шламо- и хвостохранилищами 1545 га; карьерами – 860 га; отвалами – 828 га [1]. Острой проблемой является необходимость расширения или строительство нового шламоохранилища в условиях дефицита свободных территорий.

Необходимость использования отходов горнодобывающих предприятий связана с их высокой степенью геоэкологической нагрузки на окружающую среду. Одним из способов смягчения экологических проблем, связанных с большим объемом отходов горных пород, хранящихся в горнодобывающих районах, является использование этих материалов в других отраслях промышленности. Так, например, дорожно-строительная отрасль может стать стратегическим потребителем таких отходов [2–4].

При эксплуатации, ремонте и строительстве дорог используются разнообразные технологические и технические решения, что позволяет использовать практически все виды отходов горной промышленности, за исключением тех, которые имеют повышенное содержание канцерогенов и радионуклидов. Проведенные исследования твердых отходов Качканарского ГОКа показали [1], что хвосты могут быть отнесены к категории малотоксичных и экологически безопасных, поскольку руда практически не содержит вредных примесей, а в технологии рудоподготовки, не используются химические реагенты.

В технологии возведения земляного полотна используют значительные объемы земляной массы, которую вполне могут заменить отходы горнопромышленного и горно-металлургического производства. В конструкции дорожной одежды наибольшую толщину имеют слои основания. В то же время они работают в более благоприятных условиях по сравнению с покрытиями, что дает возможность широко использовать для строительства отходы горнодобывающей и горно-перерабатывающей промышленности, в т. ч. и негабариты. Горная масса из отвалов по своим физико-механическим свойствам способна обеспечить устойчивость, прочность и долговечность земляного полотна, минимальные расходы на его возведение и содержание, перспективное развитие железнодорожной линии [4, 5].

К такой транспортной инфраструктуре относится, например, «Белкомур», при протяженности железнодорожной магистрали Соликамск – Сыктывкар – Архангельск 1161 км. «Белкомур» – железнодорожная магистраль ближайшего будущего, которая соединит Сибирь и Урал кратчайшим путем с Белым, Баренцевым и Балтийским морями.

В этом случае вместо постоянного отвала создается временный с перегрузочным складом, обеспечивающий накопление и транспортирование горной массы для строительства авто- и ж/д дорог.

Помимо технико-экономической целесообразности применение отходов горной промышленности при строительстве дорог поможет решить различные технологические и экологические проблемы: ликвидировать отвалы на борту карьера, что в свою очередь позволит расширить карьер, улучшить экологию региона и в дальнейшем перейти к безотвальной технологии добычи полезных ископаемых (рис. 2).





Рис. 2 Предлагаемый вариант технологии

Ликвидация отвалов на борту карьеров позволит сократить расстояние транспортирования и высоту подъема горной массы, увеличить эффективную глубину разработки месторождения.

При развертывании строительства имеющихся дорог, транспортных коридоров и изготовлении для них железобетонных изделий позволяет полностью перерабатывать отходы горного и металлургического производства на весь период деятельности собственно Качканарского ГОКа, при этом сконцентрировав в г. Качканар обеспечение Северных территорий Урала и прилегающих к нему районов.

Экономически-целесообразное расстояние транспортирования горной (земляной) массы автотранспортом для строительства дорог, в настоящее время, составляет 40–50 км, а ж/д транспортом – 200–300 км. С разработкой принципиально новых многозвенных автопоездов и легкой строительно-дорожной железной дороги эти расстояния постепенно могут увеличиваться, достигая до 500 км автотранспортом и 1500 км – железнодорожным.

Таким образом, использование пород из отвалов и хвостохранилищ при строительстве земляного полотна автомобильных и железных дорог позволит Качканарскому ГОКу расширить сырьевую базу дорожной отрасли, уменьшить негативное влияние на экологическую обстановку, получить дополнительную прибыль и решить проблему размещения отходов горного производства.

#### Библиографический список

1. Калабин Г. В. Оценка состояния окружающей среды территории качканарского ГОКа по данным спутникового мониторинга / Г. В. Калабин, В. И. Горный, С. Г. Крицук // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 2. – С. 179–187.
2. Agyeman S., Ampadu S. I. K. Exploring the techno-economic feasibility of mine rock waste utilisation in road works: The case of a mining deposit in Ghana // Waste Management & Research, 2016, Vol. 34, no 2, pp. 156–164. doi.org/10.1177/0734242X15611739.
3. Лютенко А. О. Анализ отходов горной добычи как потенциального источника сырья для производства дорожно-строительных материалов / А. О. Лютенко, М. С. Лебедев, В. В. Строкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 31–2. – С. 445–449.
4. Тарасов П. И. Снижение геоэкологической нагрузки горно-перерабатывающей промышленности северных и арктических территорий / П. И. Тарасов, М. Л. Хазин, О. В. Голубев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 7. – С. 74–82. doi: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-74-82.
5. Хазин М. Л. Пустые породы и отходы производства горно-обогатительных комбинатов – основа для строительства транспортных магистралей / П. И. Тарасов, М. Л. Хазин, О. В. Голубев, В. Т. Дмитриев // Известия Уральского государственного горного университета. – 2017. – №. 4 (48). С. 90–94. DOI: 10.21440/2307-2091-2017-4-90-94.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ШАРОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Шевченко Олег Игоревич,**

E-mail: [shevchenko\\_oleg@mail.ru](mailto:shevchenko_oleg@mail.ru),

Уральский федеральный университет,  
Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ,

**Рубцов Виталий Юрьевич,**

E-mail: [Uriyot@mail.ru](mailto:Uriyot@mail.ru),

Уральский федеральный университет,  
Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ,

АО «ЕВРАЗ НТМК»,

г. Нижний Тагил,

**Спирина Алина Сергеевна,**

**Панькова Наталья Александровна,**

АО «ЕВРАЗ НТМК»,

г. Нижний Тагил

**Аннотация.** Представлено исследование причин разрушения шаропрокатных валков. Причинами разрушения могут служить не только повышенные нагрузки и применение критических параметров, включающих переполнение калибра или малую толщину реборды, но также применяемый технологический процесс и оборудование для термической обработки валков. На примере разрушения реборды валка, имеющую малую толщину, показано, что для исключения разрушения реборд шаропрокатных валков при проектировании независимо от типа применяемой калибровки, необходимо закладывать ее минимально-допустимую ширину в зависимости от максимально-допустимых воспринимаемых нагрузок, а расчет калибровки производить по условию минимально-возможного переполнения калибра металлом.

В качестве другого примера разрушения валка приведен пример использования газовой печи для нагрева под закалку валка из стали 35ХГСА, после которого на поверхности образовался обезуглероженный слой, повлекший к образованию трещин и дальнейшему разрушению валка. Использование для нагрева под закалку валков из этой же марки стали в электродуговой печи показывает положительный многолетний результат их эксплуатации. В свою очередь валки из марки стали 5ХНМ хорошо поддаются термической обработке с нагревом под закалку в газовой печи и их дальнейшей безотказной эксплуатации.

**Ключевые слова.** Шаропрокатный валок, разрушение металла, твердость, реборда валка, макроструктура, микроструктура, термическая обработка, мартенсит.

Наиболее изнашиваемым элементом шаропрокатного стана является инструмент деформации: валки и направляющие проводки. В настоящее время ресурс комплекта валков до переточки составляет 600–2000 т, в зависимости от получаемого профиля и калибровки. Работа валка происходит за счет врезания реборды, поэтому износу в большей мере подлежит поверхность реборды валка. Однако отказы в работе валков могут возникать не только по причине достижения критического износа [1], а также в процессе разрушения элементов валка. Причинами разрушения могут являться как материал валков, применяемая калибровка валков, а также режимы термической обработки и условия эксплуатации [2]. Отказы в работе валков по причине разрушения также как и преждевременный износ приводят к незапланированным простоям и вынужденным перевалкам [3], поэтому исследование данных критериев является актуальной задачей. В статье будут рассмотрены причины разрушений шаропрокатных валков и мероприятия по их исключению.

Наиболее редким фактором, но встречающимся в причинах разрушения шаропрокатных валков, является применение калибровки валков с критическими параметрами. Основной задачей при калибровке шаропрокатных станов является соблюдение закона постоянства сохранения временных объемов, другими словами, чтобы по ходу продвижения металла между валками объем, ограниченный ребрами валка, включая перемышку, всегда был постоянным. По теории А. И. Целикова [4] допускается проектирование валков с максимальным переполнением калибра на 4 %. При незаполнении калибров происходит отсутствие прилегания металла к реборде, что может привести к переходу проката на рейку, поэтому на большинстве калибровок первоначально заложено незначительное переполнение. Превышение допустимого переполнения приводит как к увеличенному износу валков, так и к получению некондиционных шаров, вплоть до получения эффекта Маннесман.

Вторым немаловажным фактором при возможности разрушения является минимальная толщина реборды на поверхности валка, как элемента, воспринимающего максимальные нагрузки. Авторами из Люблинского университета были предложены несколько моделей валков, при которых толщина реборды может увеличиваться, уменьшаться либо оставаться примерно постоянной по ходу движения металла [6]. Нами также были предложены концептуальные конструкции валков как с постоянной, так и с переменной шириной реборды при сохранении постоянства объема [7]. Наиболее эффективное отделение перемышки происходит при минимальной ширине реборды в точке скрещивания, однако это приводит к интенсивности износа в данной зоне и дальнейшему образованию гирлянд в процессе прокатки. Обобщая полученные в исследованиях [3, 6, 8–11] результаты можно утверждать, что калибровки стоит строить таким образом, чтобы толщина реборды возрастала в особенно интенсивных зонах, таких как зона отделения перемышки. Также причиной износа в данной зоне является разность диаметров валков и появление знакопеременных усилий, необходимых для закручивания шара и отделения перемышки, кроме этого, в зоне скрещивания работа по врезанию реборды в металл осуществляется только за счет отрезного валка.

При рационально проведенной калибровке валка износ реборд характеризуется абразивным износом по торцу реборды. В частном случае при изготовлении валка визстали 5ХНМ и относительно низкой твердости закаленного слоя, составляющей 38–42 HRC, произошло разрушение реборды с отделением значительных участков.



Рис. 1 Разрушение реборды валка в зоне отделения перемышки

Для выявления причины такого разрушения был взят образец, отделившейся от валка (рис. 1), разрушенной реборды 30×250 мм (рис. 2) для проведения металлографического исследования. Твердость образца после измерения составила 31,5...38,5 HRC, что является ниже заданной. Оценка микроструктуры производилась на

оптическом микроскопе «LeicaMEF4A» на 2-х поперечных шлифах до и после травления в 3 %-м спиртовом растворе азотной кислоты, при увеличениях  $\times 50 \dots 500$ .

Согласно результатам исследования микроструктура основного металла реборды валка равномерная, представляет собой отпускаемый мартенсит (рис. 2, в).

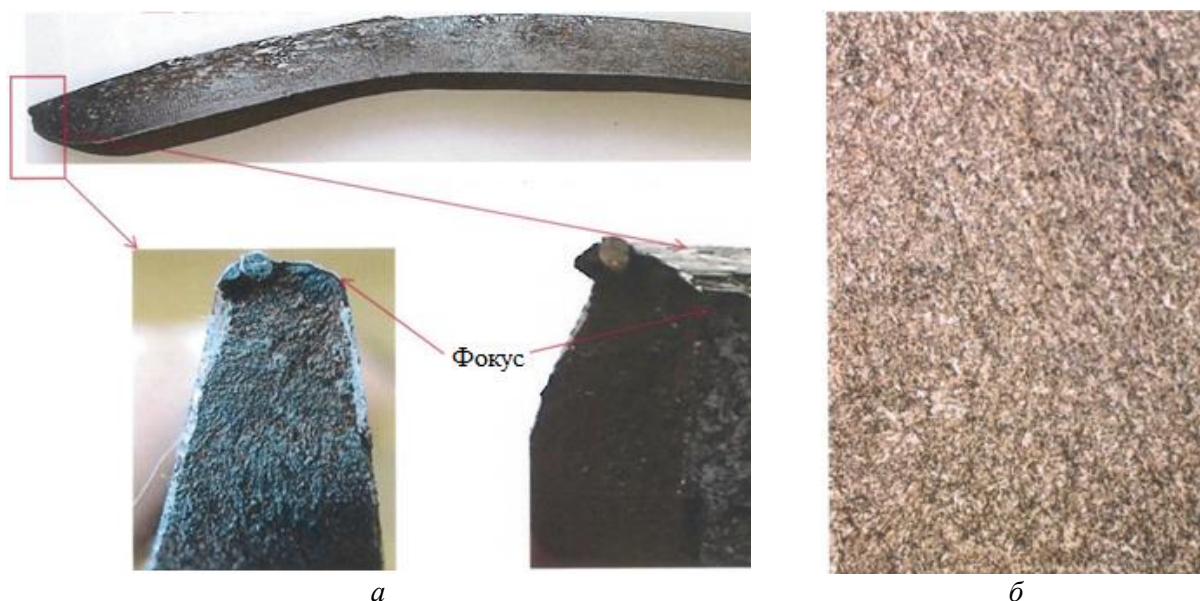


Рис. 2 Внешний вид (а) и структура  $\times 500$  (б) основного металла реборды

На боковые поверхности реборды, а также на ее вершину приварился металл прокатываемой заготовки (рис. 3, а) с последующим отрывом части поверхности валка, изменением структуры металла валка и появлением микротрещин (рис. 3, б). Микроанализом по месту фокуса разрушения выявлен белый слой мартенсита глубиной до 0,35 мм (рис. 3, в). Неметаллические включения, ликвация серы и фосфора по месту разрушения отсутствуют. Вследствие вышесказанного, причиной разрушения реборды послужила адгезия прокатываемого горячего металла, что подтверждает налипание металла на боковую поверхность и вершину реборды.

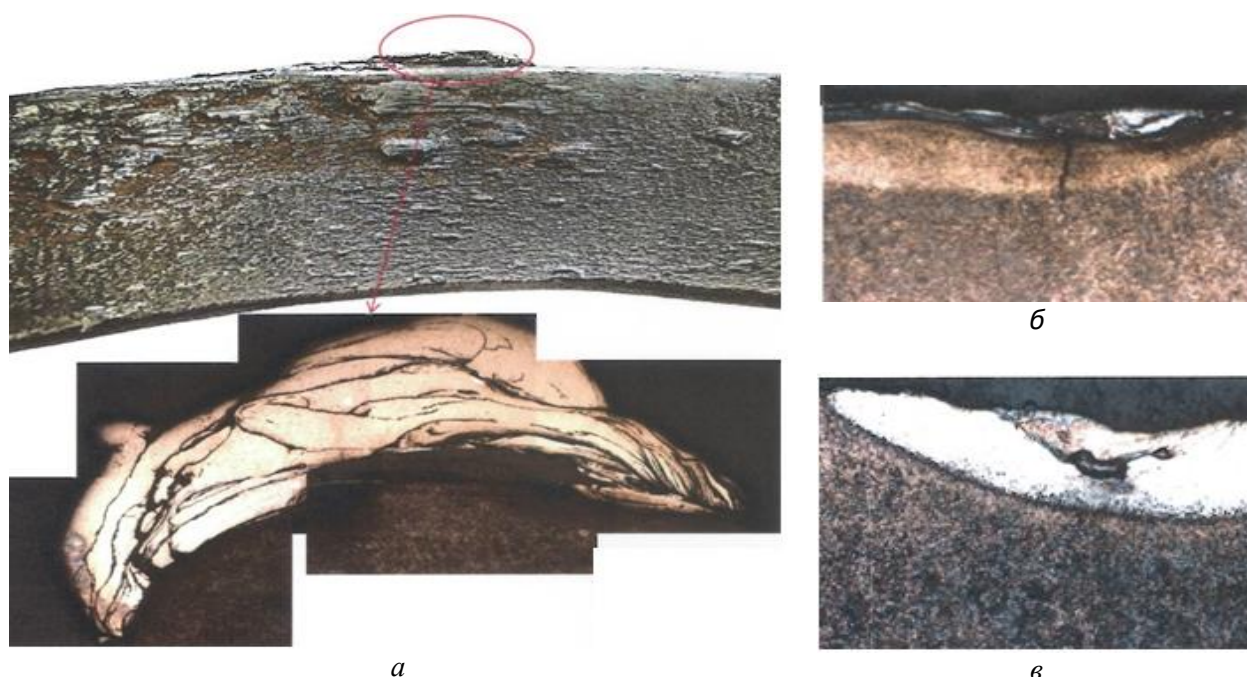


Рис. 3 Микроструктура металла реборды по месту фокуса разрушения:  
а – приварившийся металл прокатываемой заготовки на вершине реборды ( $\times 50$ );  
б – микротрещины и изменение структуры ( $\times 100$ ); в – белый слой ( $\times 50$ )

В данном случае незначительное повышение нагрузки привело к перегреву реборды, за счет ее малой толщины (9,5 мм), и дальнейшему разрушению. Как следствие толщина реборд имеет немаловажное значение при проектировании шаропрокатных валков.

Исключив причины в виденверной калибровки валков и настройки стана, рассмотрим разрушения, связанные с термической обработкой применяемых сталей (на примере стали 35ХГСА). Бочки валков из данной стали регулярно используются в условиях шаропрокатного участка крупносортового цеха, где нагрев под термическую обработку выполнялся с использованием электродуговой печи. В качестве эксперимента данная сталь была использована на площадке шаропрокатного участка рельсобалочного цеха, вместо применяемой там стали 5ХНМ. Режимы термообработки были идентичны как для крупносортового, но в силу технических возможностей цеха нагрев производился в газовой печи. В процессе первой же завалки валков и пробной прокатки произошло полное разрушение валка, причем трещины, явившиеся причиной разрушения, возникали не только вдоль концентраторов напряжений (шпоночных пазов и т. д.), а параллельно оси валка по всему периметру (рис. 4). Изломы, образовавшиеся с обеих сторон выколовшейся части валка, хрупкие, с фокусами, идущими от поверхности калибра. На поверхности реборд калибра обнаружены поперечные трещины.



Рис. 4 Разрушенный валок

Химический состав металла валка, согласно исследованию химического состава, соответствует требованиям к стали 35ХГСА по ГОСТ 4543–2016 [12] (табл. 1).

Таблица 1  
Химический состав образца валка

Наименование	Содержание элементов в %,масс							
	С	Мn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
Образец валка	0,347	0,93	1,25	1,33	0,042	<0,005	0,0045	0,011
Состав по ГОСТ 4543–2016	0,32– 0,39	0,8–1,1	1,1–1,4	1,1–1,4	Не более			
					0,3	0,3	0,025	0,025

Макроанализ поперечного сечения (рис. 5, а), выполненный методом глубокого травления в горячем 50 % водном растворе соляной кислоты, показал, что в районе разрушения, выявлены:

- закаленный слой, идущий по впадинам калибра на глубину 10 мм,
- сквозная закалка реборд калибра,
- пятнистая ликвация 3 балла по ГОСТ 10243–75 [13].

Распределение твердости по сечению валка неравномерное представлено (рис. 5, б) и составляет на поверхности от 48 HRC с постепенным снижением до 45 HRC. Твердость основного металла, измеренная методом Бринелля, составила 255 НВ.

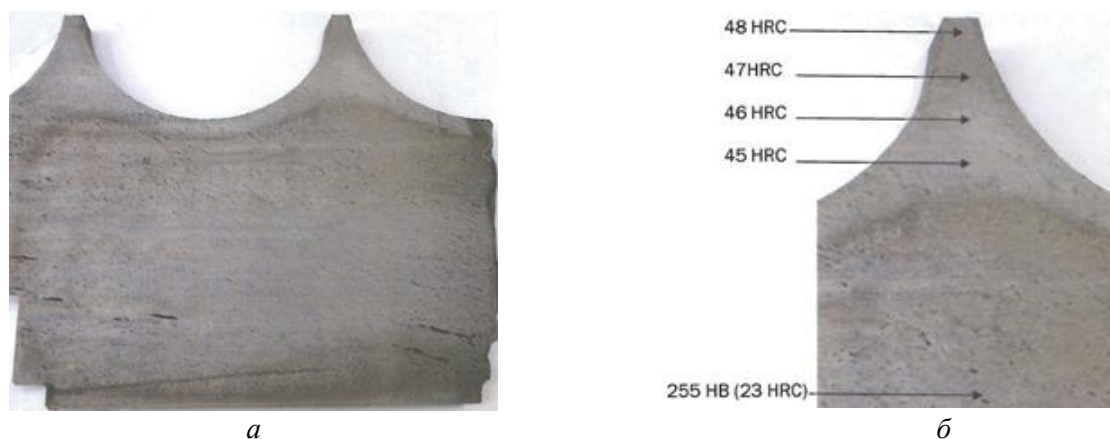


Рис. 5 Макростроение (а) и распределение твердости по сечению валка (б)

Микроанализ валка (рис. 6.) выявил наличие недопустимого обезуглероженного слоя глубиной до 0,3 мм на поверхности калибра. По одной из боковых сторон выявлены термические трещины глубиной до 15 мм и выкрашивание металла по ним (рис. 6, а).

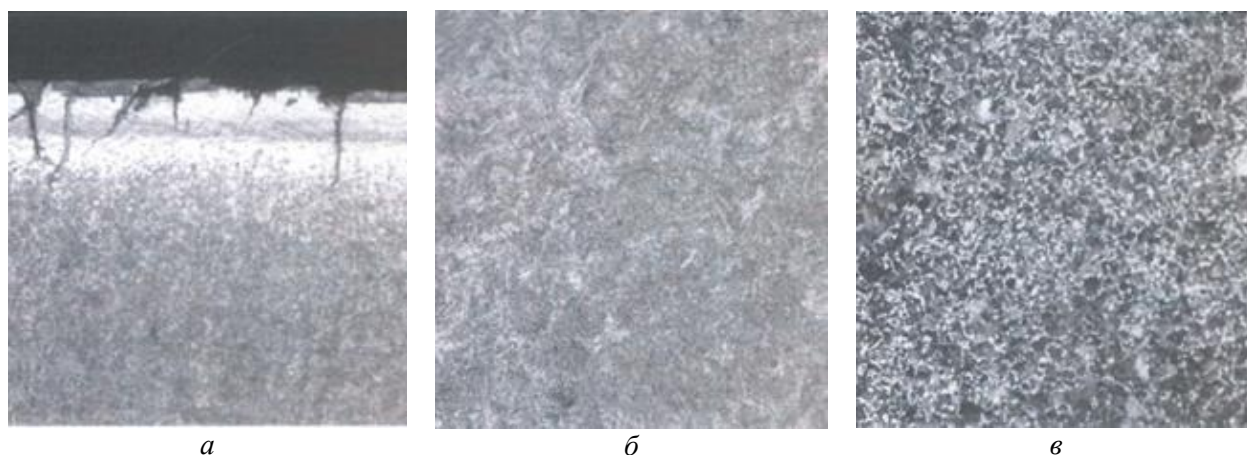


Рис. 6 Структура валка после эксплуатации:  
а – поверхность,  $\times 100$ , б – закаленный слой  $\times 500$ , в – основной металл  $\times 100$

Микроструктура закаленного слоя, идущего по калибрам, представляет собой отпущенный мартенсит с участками остаточного аустенита (рис. 6, б). Структура основного металла феррито-перлитная разнотельная с размером зерна 6–8 номера ГОСТ 5639–82 [14] (рис. 6, в).

В результате вышесказанного можно предполагать, что не только соблюдение временно-температурных режимов при термической обработке шаропрокатных валков влияет на их дальнейшую структуру, в т. ч. и работоспособность, но также и оборудование на котором производится термическая обработка. При условии, что сталь 5ХНМ, используемая для шаропрокатных валков рельсобалочного цеха, не подвергается обезуглероживанию в газовой печи, для стали 35ХГСА это явилось ключевым параметром, что привело к разрушению валков.

#### Выводы

1. Для избежания разрушения шаропрокатных валков и их элементов при проектировании независимо от типа применяемой калибровки необходимо закладывать минимально-допустимую ширину реборды в зависимости от максимально-допустимых воспринимаемых нагрузок.

2. Калибровку валков стоит рассчитывать по условию минимально-возможного переполнения, что даст гарантию отсутствия тангенциальных нагрузок при нахождении металла между соседними калибрами в процессе прокатки, и увеличит ресурс валков.

3. Кроме конструкции самих шаропрокатных валков также немаловажным является технология их изготовления, в т. ч. соблюдение режимов термической обработки и выбор оборудования на котором она производится. К примеру, для материала валка из стали 5ХНМ использование газовой печи для нагрева под закалку допустимо, а для валка из стали 35ХГСА недопустимо, что показал опыт в данной статье.

#### Библиографический список

1. P. Chyla, Z. Pater, J. Tomczak, P. Chyla Numerical analysis of a rolling process for producing steel balls using helical rolls // Arch. Metall. Mater., Vol. 61, No 2, – 2016. – pp. 485-492.

2. Lam M.M., Serov A.I., Ternavskiy A.A., Bazarova G.S., Smyrnov Y.N. Heat treatment of rollers in the ShPS 30-80 ball-rolling mill at JSCDMPZ /Steelin Translation. Vol. 45. – 2015. -no. 10. – pp. 784–788.

3. Rubtsov, V. Yu & Shevchenko, O. I. Charakterintensivnosti iznosasharoprokatnyh valkov i kriterii otbrakovki [Cause of wear rate of ball-rolling rolls and reject criteria] / Proceedings of the XII Congress of rollinger. – 2019. T.1. – С. 187–191. (In Russ).

4. Tselikov, A. I. and Barbarich, M. V., Spetsial'nyeprokatnyestany (Special Rolling Mills), Moscow: Metallurgiya, 1971.

5. Kozhevnikova G. V. Usloviya ustojchivogoprotekanijapoperechnoj i poperechno-klinovojprokatok [Conditions of stable flow of cross rolling and cross-wedge rolling]. Vestnik Belorussko-Rossijskogouniversiteta – Bulletin of the Belarusian-Russian University, 2009, no. 1 (22), pp. 44–53.

6. Zbigniew Pater, Janusz Tomczak, Jaroslaw Bartnicki, Tomasz Thermomechanical Analysis of a Helical-Wedge Rolling Process for Producing Balls // Metals, – October 2018. – pp. 1–14.

7. Rubtsov, V. & Shevchenko, O. (2018). Calibration of ball-rolling rollers with continuously variable pitch. Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. 58-63. 10.32339/0135-5910-2018-8-58-63.

8. V. B. Protasyev, N. N. Design of Rolls For Hot Cross-helical Rolling of Billets Without Defects in The Axial Zone // Chernye Metally., No 3, – 2020. – pp. 42–47.

9. Yang, S. C.; Chen, C. K. The surface geometry of rollers with skew rolling of steel balls. Proc. Inst. Mech. Eng. C J. Mech. Eng. Sci. 2001, 215, 523–532.

10. Shi, X.; Wang, B.; Li, Z. Optimization of pass parameters on two-grooves skew rolling for Al ball. Key Eng. Mater. 2010, 419, 313–316.

11. Cao, Q.; Hua, L.; Qian, D.S. Numerical simulation on hot helical rolling forming process of blank for bearing steel balls. Bearing 2015, 1, 16–21.

12. GOST 4543–2016. Metalloprodukcija iz konstrukcionnoj legirovannoj stali [Structural alloy steel products. Specifications] Moscow, Standartinform Publ., 2016, 53 p. (In Russ.).

13. GOST 10243–75 Stal'. Metody ispytanij i ocenki makrostruktury [Steel. Methods of test and estimation of macrostructure] Moscow, Izdatel'stvo standartov., 1985, 37 p. (In Russ.).

14. GOST 5639–82 Stali i splavy. Metody vyjavlenija i opredelenija velichiny zerna. [Steels and alloys. Methods for detection and determination of grain size] Moscow, Izdatel'stvo standartov., 2003, 38 p. (In Russ.).

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ

Шевченко Олег Игоревич,

E-Mail: [shevchenko\\_oleg@mail.ru](mailto:shevchenko_oleg@mail.ru),

Трекин Григорий Евгеньевич,

Уральский федеральный университет,

Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ

**Аннотация.** Технологии цементации стали в настоящее время хорошо изучены и являются одними из традиционных процессов химико-термической обработки стали. Им присущ ряд недостатков: высокое энергопотребление, длительные выдержки, сложная обработка крупных изделий и поверхностей. В качестве альтернативного способа предложено электроискровое насыщение поверхности углеродом (по схеме электроискрового легирования). Степень науглероживания и глубина рабочего слоя могут быть увеличены при использовании процесса в ультразвуковом поле. Для выявления влияния специфических зон ультразвуковых волн на формируемый упрочненный слой реализована резонансная схема введения колебаний со стоячей волной, генерируемой в исследуемом образце. Наибольшая насыщенность углеродом поверхностного слоя обнаружена в области узла колебаний стоячей ультразвуковой волны, где циклическое растяжение и сжатие среды способствуют зарождению избыточных фаз. Углерод в мартенсите, оцененный по соотношению с/а, составлял 0,78 мас.%. Наибольшая глубина слоя цементита и размер переходной зоны находятся в области пучности ультразвуковой волны, где наблюдается наибольшее динамическое смещение частиц среды под действием колебаний.

**Ключевые слова.** Электроискровое легирование, химико-термическая обработка, цементация, ультразвуковые колебания, резонансная схема, рентгеновский фазовый анализ, поверхностный слой, мартенсит, цементит аустенит, поверхностное упрочнение, диффузия, глубина цементации, микроструктура, микротвердость.

Науглероживание коммерчески применяется для повышения твердости и износостойкости поверхности при сохранении ударной вязкости сердцевины [1]. Цементация с применением твердого карбидобразователя, цементация в жидкой фазе и газовая [1–3] являются традиционными хорошо изученными методами и, несмотря на их широкое распространение, имеют ряд больших недостатков: длительность процесса, высокая температура [4, 5], приводящая к росту аустенита, а, следовательно, необходимости дополнительной термической обработки [6–8]. Химико-термическая обработка крупногабаритных деталей и инструмента деформации [9] также весьма сложна с технологической точки зрения.

Опыт последних лет демонстрирует попытки получения цементованного слоя на поверхности деталей с использованием искрового разряда [10–14]. Они основаны на процессе электроискрового легирования (ЭИЛ) (рис. 1) при котором электрический разряд разрушает анод и его эрозионные материалы переносятся на катод (обрабатываемую деталь) [15, 16].

Высокая температура разряда приводит к тому, что частицы электродного материала плавятся и частично испаряются. Пары материала расширяются и удаляют с поверхности частицы анода, который, проходя через газовую среду, проникает в катод и образует упрочненный слой. Катодная зона также мгновенно нагревается и сразу же охлаждается за счет теплопроводности, поверхность закаливается, увеличивая твердость.

Применение электроискровой цементации значительно снижает энергоемкость процесса и повышает производительность труда. В отличие от обычного процесса недолгие выдержки при высоких температурах не приводят к росту аустенита. Хотя этот метод выглядит технически привлекательным, слой цементита недостаточно глубок и имеет низкую степень цементации.





Рис. 1 Электроискровое легирование плоского (а) и цилиндрического (б) изделия

Цель данных исследований состоит в интенсификации диффузионных процессов электроискрового науглероживания с помощью ультразвуковых колебаний (УФ). Резонансная схема использовалась для выявления специфического действия ультразвуковых колебаний в зонах узлов и пучностей стоячей волны. Этот метод хорошо зарекомендовал себя при изучении влияния ультразвука на формирование наплавленного покрытия и был реализован в наших исследованиях [17–19]. Размер пластин соответствует длине звуковой волны ( $\lambda$ ) в низкоуглеродистой стали (рис. 2). В образце генерировалась стоячая ультразвуковая волна с частотой 18 кГц и расчетной амплитудой 12,6 мкм.

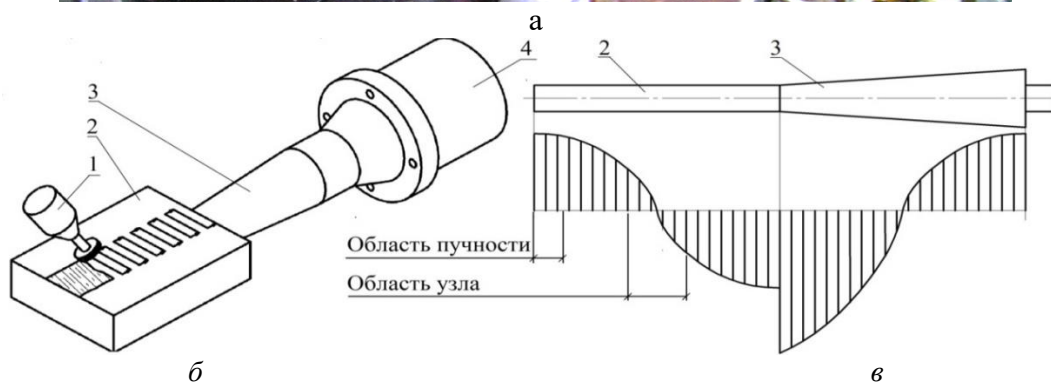
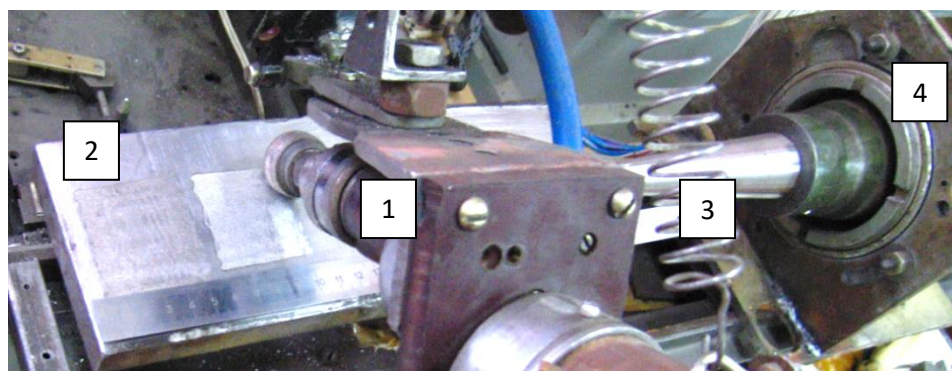


Рис. 2 Оборудование (а), схема (б) электроискровой цементации в поле УЗК и распределение амплитуд колебаний в стоячей волне (в); 1– инструмент ЭИЛ, 2 – образец, 3 – концентратор ультразвуковых колебаний, 4 – магнестрикционный преобразователь

Испытуемые образцы вырезали из пластины в областях узла и пучности стоячей волны (рис. 2). Основной металл, то есть пластину из стали 20, подвергали термической обработке тремя способами: отжигом (охлаждение с печью), нормализацией (принудительная продувка воздухом), закалкой (охлаждение в спреерном устройстве для быстрого охлаждения). Содержание углерода определяли в поверхностном слое

с помощью ионно-оптического эмиссионного спектрометра *Bruker Q2 ION*, структуру исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа *Phenom G2 Pure*, твердость, распределенную по глубине слоя, исследовали с помощью автоматического микротвердомера *FutureTechFM-300*. Рентгеновский дифрактометр *Bruker D8 Advance* использовался для фазового рентгеновского анализа в излучении  $K\alpha$ -Cu, в  $\theta$ - $\theta$  геометрии путем ступенчатого сканирования в диапазоне углов  $2\theta = 30$ – $140^\circ$ .

Фазовый анализ упрочненных слоев показал максимальное влияние ультразвуковых колебаний в областях вблизи узла колебаний стоячей волны. Интенсивность линий цементита и аустенита значительно возрастает, и мартенситный дублет хорошо обнаруживается (рис. 3). Содержание углерода в мартенсите, оцененное по соотношению  $c/a$ , составило 0,78 мас. %.

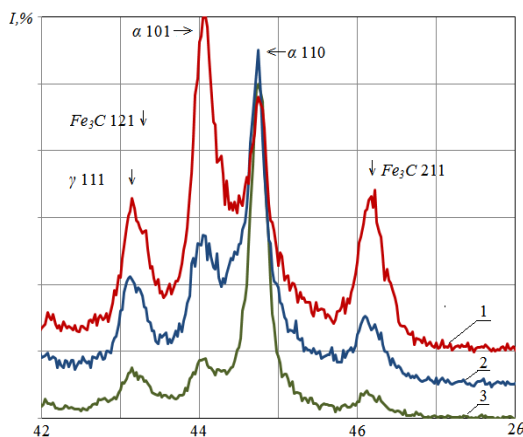


Рис. 3 Участки дифрактограмм упрочненного слоя (в области узла – 1, пучности – 2 колебаний стоячей волны, без ультразвуковых колебаний – 3)

Как было предсказуемо, наименьшая степень цементации была получена для образцов без ультразвукового воздействия, на основе отожженной стали и после нормализации (0,80 и 1,15 % C) соответственно (рис. 4). Ультразвуковые колебания повышают содержание углерода в цементованном слое, причем наиболее значительно этот эффект проявляется в области циклического растяжения и сжатия среды (т. е. в узле колебания стоячей волны). Наибольшая степень цементации была достигнута на основном металле после нормализации и закалки (2,20 и 2,15 % c). Среднее содержание углерода в упрочненном слое образцов, вырезанных из области пучности стоячей волны, также выше и составляет 1,2–1,4 %.

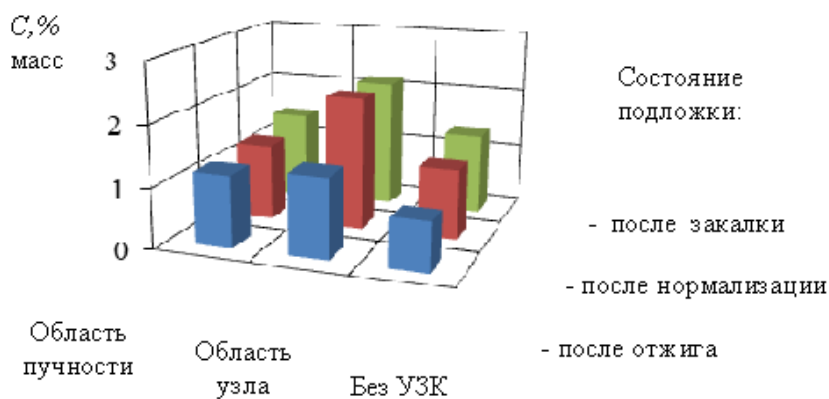


Рис. 4 Среднее содержание углерода в цементованном слое (% масс) в характерных участках стоячей ультразвуковой волны при различных вариантах предварительной термической обработки подложки

Глубина получаемого слоя является ключевым параметром процесса ЭИЛ-цементации, который может быть приблизительно определен на наклонных шлифах. Эти значения имеют высокую погрешность измерения из-за некоторых специфических свойств технологического процесса ЭИЛ и структуры упрочненного слоя, однако этого достаточно для представления качественной картины.

Металлографические исследования показали, что на поверхности образца, подвергнутого ЭИЛ-цементации, можно выделить четыре характерных участка: 1 – верхняя зона: «островковое», фрагментированное покрытие с повышенной шероховатостью поверхности (рис. 5, а); 2 – «белый» твердый слой; 3 – переходный слой (рис. 5, б); 4 – основной металл (рис. 5, в, г).

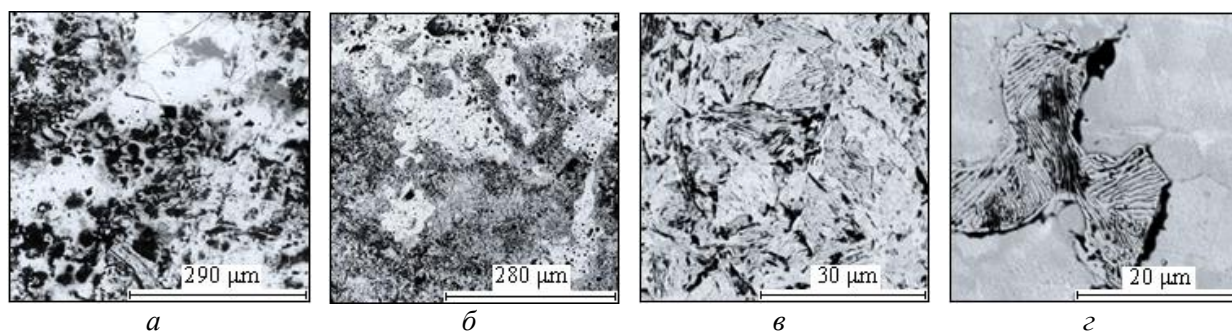


Рис. 5 Структура упрочненного слоя (наклонный шлиф): а – фрагментированное покрытие; б – диффузионный слой. Основной металл: в – после закалки; г – после отжига

После обработки данных о глубине слоя, полученных прямым измерением, было установлено, что слой минимален при электроискровой цементации без ультразвуковых колебаний, т. е.  $0,06 \pm 0,02$  мм. Можно отметить, что глубина увеличивается при изменении состояния основного металла от отожженного к закаленному, хотя и близка к пределу статистической погрешности. Ультразвуковое воздействие увеличивает глубину до  $0,10 \pm 0,02$  мм, причем в пучности она выше, чем в узле.

Степень развития диффузионных процессов можно оценить по длине переходной зоны  $\Delta$ , мм (рис. 6). Значения параметра  $\Delta$  максимальны в области пучности стоячей волны и увеличиваются при уменьшении размеров структурных составляющих подложки. Расширение переходной зоны достигает максимума (до 0,02 мм) при электроискровой цементации образцов с основой после нормализации и закалки. В узле УЗК и во время процесса без ультразвуковых колебаний значения  $\Delta$  близки и составляют 0,017 и 0,014 мм соответственно (рис. 7).

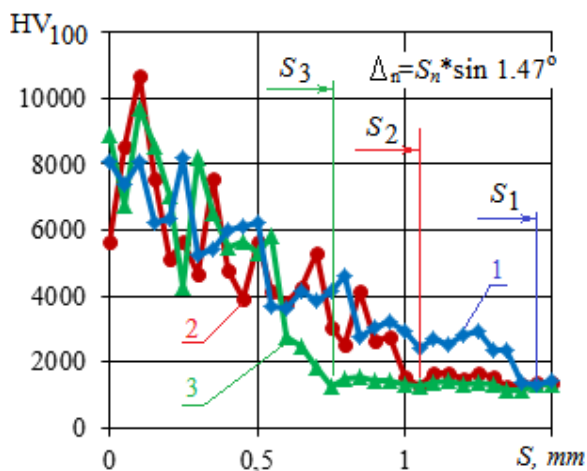


Рис. 6 Микротвердость ( $HV_{100}$ ) цементованного слоя, распределение по глубине ( $S$ ), измерено на наклонных шлифах: 1 – область пучности; 2 – область узла колебаний стоячей УЗ волн; 3 – без УЗК. Предварительная термообработка подложки – нормализация

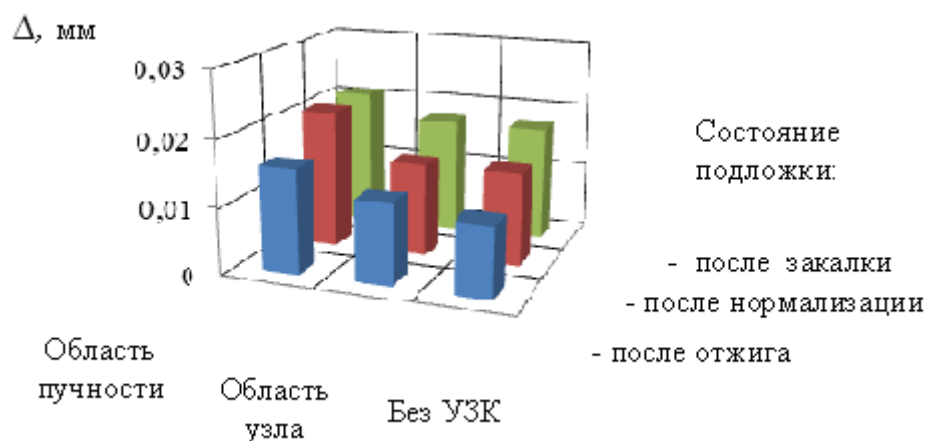


Рис. 7 Размеры переходной зоны цементированного слоя  $\Delta$ , мм

Таким образом, электроискровая цементация эффективна для поверхностной обработки крупногабаритных изделий и, в отличие от обычной химико-термической обработки, это заключительная, последняя технологическая операция. Качественные характеристики упрочненного слоя (степень и глубина цементации) могут быть увеличены при обработке в поле ультразвуковых колебаний. Резонансный контур, использованный в эксперименте, позволил определить влияние репрезентативных областей стоячей ультразвуковой волны на свойства цементированного слоя. Наибольшая степень цементации была обнаружена в области узла стоячей ультразвуковой волны, где циклическое растяжение и сжатие способствуют выделению избыточных фаз. Диффузионные процессы, определяющие глубину упрочненного слоя и размер переходной зоны, в свою очередь, максимальны в области пучности ультразвуковой волны, где наблюдается наибольшее динамическое смещение частиц среды под действием колебаний. Дисперсность компонентов структуры основного металла также ответственна за увеличение глубины упрочненного слоя. Она достигает  $0,10 \pm 0,02$  мм в сочетании с ультразвуковым воздействием на образцы после нормализации и закалки.

#### Библиографический список

1. Smirnov M. A., Schastlivtsev V. M., Zhuravlev L. G. 1999 Osnovy termicheskoi obrabotki stali. Ekaterinburg: UrO RAN. – 1999. – 496 p. (in Russian).
2. Smith, N. F. 1983 Control and instrumentation of gas carburising. Metallurgia, 50(12), pp. 502–505.
3. Sahay, S. S. and Mitra, K., 2004. Cost model based optimisation of carburising operation. Surface Engineering, 20(5), pp. 379–384.
4. Chatterjee-Fischer, R., 1985. Review of the Possibilities of Shortening the Carburization Time. Haerterei-Technische Mitteilungen, 40(1), pp. 7–8, 9.
5. Gräfen, W. and Edenhofer, B., 2005. New developments in thermo-chemical diffusion processes. Surface and Coatings Technology, 200(5–6), pp. 1830–1836.
6. Rudnizki, J., Zeislmaier, B., Prah, U. and Bleck, W., 2010. Prediction of abnormal grain growth during high temperature treatment. Computational Materials Science, 49(2), pp. 209–216.
7. Ivanov, A. S., Greben'kov, S. K., & Bogdanova, M. V. (2016). Optimization of the process of carburizing and heat treatment of low-carbon martensitic steels. Metal Science and Heat Treatment, 58(1)
8. Risse, S., Clausen, B., Hoffmann, F. and Zoch, H., 2011. Concerning the influence of pre-heat treatments on the grain size stability of microalloyed carburising steels. International Heat Treatment and Surface Engineering, 5(3), pp. 127–132.

9. Fainshmidt, E. M. and Pegashkin, V. F., 2000. Thermochemical treatment of tools for hot forging. *Metal Science and Heat Treatment*, 42(7–8), pp. 263–266.
10. Mihailov, V., Gitlevich, A., Cazac, G. and Baciuc, C., 2009. Features of electro-spark alloying on titanium by graphite, *BALTTRIB 2009 – 5th Int. Conference, Dedicated to Lithuanian Millennium, 85th Anniversary of Lithuanian University of Agriculture, and 60th Anniversary of Department of Mechanical Engineering, Proc. 2009*, pp. 282–287.
11. Mikhailyuk, A. I. and Gitlevich, A. E., 2010. Application of graphite in electrospark technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 46(5), pp. 424–430.
12. Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Gaponova, O., Konoplianchenko, I., Belous, A., Gerasimenko, V. and Zakharov, M., 2017. New method for strengthening surfaces of heat treated steel parts, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2017*, 233(1), № 012048.
13. Tarel'nik, V. B., Paustovskii, A. V., Tkachenko, Y. G., Martsynkovskii, V. S., Belous, A. V., Konoplyanchenko, E. V. and Gaponova, O. P., 2018. Electrospark Graphite Alloying of Steel Surfaces: Technology, Properties, and Application. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 54(2), pp. 147–156.
14. Konoplianchenko, I., Tarelnyk, V., Antoszewski, B., Martsynkovskyy, V., Belous, A., Gerasimenko, V. and Vasilenko, O., 2018. Mathematical modeling a process of strengthening steel part working surfaces at carburizing thereof by electroerosive alloying method, *AIP Conference Proceedings 2018, Volume 2017, 1 October*, № 020008.
15. Lešnjak, A. and Tušek, J., 2002. Processes and properties of deposits in electrospark deposition. *Science and Technology of Welding and Joining*, 7(6), pp. 391–396.
16. Tarel'nyk, V. B., Gaponova, O. P., Konoplyanchenko, Y. V. and Dovzhyk, M. Y., 2016. Investigation of regularities of the processes of formation of surface layers with electroerosive alloying. Part i. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 38(12), pp. 1611–1633.
17. Gavrilova, T. M., Trekin, G. E., Shevchenko, O. I. and Farber, V. M. 2001. Geometric parameters and structure of layer surfaced in ultrasonic field. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*, (6), pp. 39–41.
18. Gavrilova, T. M., Trekin, G. E., Shevchenko, O. I. and Farber, V. M. 2004. Influence of ultrasound on phase composition of 10R6M5 coatings. *Tyazheloe Mashinostroenie*, (6), pp. 31–33.
19. Shevchenko, O. I. 2004. Plasma surfacing and ultrasound. *Tyazheloe Mashinostroenie*, (6), pp. 26–27.

## **ПРОТИВОТОЧНЫЙ СТУПЕНЧАТЫЙ ХОЛОДИЛЬНИК СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА**

**Шишкин Алексей Сергеевич,**

E-Mail: a.s.shishkin@urfu.ru,

Уральский федеральный университет,

Институт новых материалов и технологий,

Департамент строительного материаловедения,

**Шишкин Сергей Федорович,**

E-Mail: shsf@planet-a.ru,

Уральский федеральный университет,

г. Екатеринбург

**Аннотация.** В статье предложен метод расчета противоточного ступенчатого холодильника. В основу метода положена матричная модель теплового баланса по отдельным ступеням охлаждения. Предложенная система уравнений позволяет рассчитать необходимое число ступеней, необходимый расход воздуха для охлаждения сыпучего

материала до заданного уровня. Метод использовался для проектирования циклонного теплообменника печи кальцинации глинозема и для создания противоточного жалюзийного холодильника пропантов. Метод позволяет учитывать степень незавершенности теплообмена на отдельных ступенях и минимизировать расход воздуха на охлаждение. Приводятся примеры промышленного внедрения. Отмечается применимость метода для расчета противоточных подогревателей сыпучих материалов. Использование ступенчатого противоточного теплообменника позволяет утилизировать тепло выходящего из печи сыпучего материала и тепло отходящих газов в случае противоточного подогревателя материала.

**Ключевые слова.** Сыпучий материал, глинозем, пропант, противоточный теплообменник, жалюзийный холодильник, циклонный холодильник, расход воздуха.

Во многих отраслях промышленности актуальна задача охлаждения или нагрева сыпучего материала [1–10]. Для получения максимального экономического эффекта целесообразно использовать тепло отходящих дымовых газов и тепловую энергию выходящего из печи материала [5–8]. Технически эта задача реализуется за счет установки соответствующих теплообменных устройств – нагревателей и холодильников сыпучего материала. Такой подход позволяет экономить топливо, увеличить производительность, т. е. создавать эффективные тепловые установки. В качестве примера можно привести циклонную печь кальцинации для получения глинозема [8]. В данном устройстве тепло дымовых газов используется для сушки и нагрева материала, поступающего в кальцинатор, а при охлаждении выходящего глинозема используется воздух, который проходит четырехступенчатый противоточный холодильник, и затем поступает на горение. Таким образом, тепловые потери с дымовыми газами и выходящим материалом минимизируются. В цементных печах сухого способа для нагрева сырьевой муки часто применяются четырехступенчатые циклонные теплообменники.

Важной проблемой является охлаждение сыпучего материала при невысоких температурах, например с 300–200 до 80–70 °С. Рассмотрим данную задачу. Эффективным способом ее решения является реализация противоточной ступенчатой схемы охлаждения. Расчетная схема холодильника представлена на рис. 1. Материал поступает в первую ступень теплообменника и движется в направлении последней ступени. Воздух поступает в последнюю ступень холодильника и движется в противотоке в направлении первой ступени. Известны температуры  $t_{m0}$ ,  $t_{\theta 0}$  соответственно сыпучего материала и воздуха на входе в холодильник и расход сыпучего материала  $G$ . Необходимо рассчитать расход воздуха  $V$ , м<sup>3</sup>/с, чтобы обеспечить заданную конечную температуру  $t_{mk}$  сыпучего материала на выходе из холодильника.

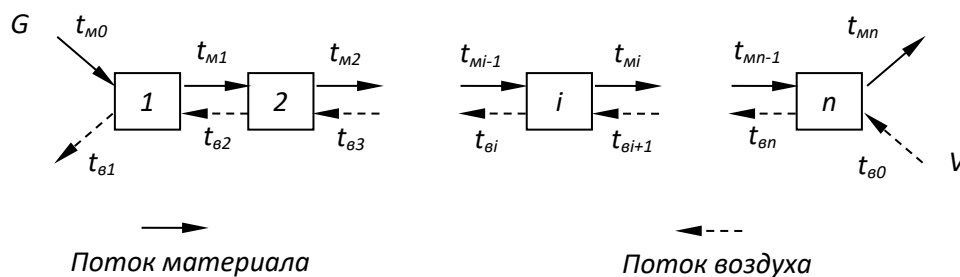


Рис. 1 Расчетная схема противоточного холодильника

На схеме приняты следующие обозначения:  $t_{mi}$ ,  $t_{\theta i}$  – температуры материала и воздуха на выходе  $i$ -й ступени;  $t_{mi-1}$ ,  $t_{\theta i+1}$  – температуры материала и воздуха на входе в  $i$ -ю ступень. В общем случае удельная теплоемкость воздуха  $c_v$  и сыпучего материала  $c_m$  зависят от температуры, поэтому система уравнений теплового баланса для  $n$  секций холодильника будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Gc_M(t_{M0})t_{M0} + Vc_B(t_{e2})t_{e2} = Gc_M(t_{M1})t_{M1} + Vc_B(t_{e1})t_{e1} + Q_1 \\ Gc_M(t_{M1})t_{M1} + Vc_B(t_{e3})t_{e3} = Gc_M(t_{M2})t_{M2} + Vc_B(t_{e2})t_{e2} + Q_2 \\ Gc_M(t_{M2})t_{M2} + Vc_B(t_{e4})t_{e4} = Gc_M(t_{M3})t_{M3} + Vc_B(t_{e3})t_{e3} + Q_3 \\ \cdot \cdot \cdot \\ Gc_M(t_{Mi-1})t_{Mi-1} + Vc_B(t_{ei+1})t_{ei+1} = Gc_M(t_{Mi})t_{Mi} + Vc_B(t_{ei})t_{ei} + Q_i \\ \cdot \cdot \cdot \\ Gc_M(t_{Mn-1})t_{Mn-1} + Vc_B(t_{e0})t_{e0} = Gc_M(t_{Mn})t_{Mn} + Vc_B(t_{en})t_{en} + Q_n \end{array} \right. \quad (1)$$

Левая часть каждого уравнения представляет приход тепла (поток энтальпий) в данную секцию, правая – расход тепла,  $Q_i$  – потери тепла через ограждение в окружающую среду. Для холодильника на первом этапе вычислений можно принять, что теплоемкость материала и воздуха в заданном интервале температур постоянна, а тепловыми потерями можно пренебречь. Тогда система  $n$  уравнений теплового баланса для секций холодильника примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Gc_M t_{M0} + Vc_B t_{e2} = Gc_M t_{M1} + Vc_B t_{e1} \\ Gc_M t_{M1} + Vc_B t_{e3} = Gc_M t_{M2} + Vc_B t_{e2} \\ Gc_M t_{M2} + Vc_B t_{e4} = Gc_M t_{M3} + Vc_B t_{e3} \\ \cdot \cdot \cdot \\ Gc_M t_{Mi-1} + Vc_B t_{ei+1} = Gc_M t_{Mi} + Vc_B t_{ei} \\ \cdot \cdot \cdot \\ Gc_M t_{Mn-1} + Vc_B t_{e0} = Gc_M t_{Mn} + Vc_B t_{en} \end{array} \right. \quad (2)$$

Для тонкодисперсного материала, например, для глинозема, процесс теплообмена завершается достаточно быстро и можно принять, что температуры материала и воздуха на выходе из каждой ступени равны. Для более крупного сыпучего материала процесс теплообмена не успевает завершиться, и можно записать для произвольной ступени холодильника следующее соотношение:

$$t_{ei} = \eta t_{Mi}, \quad (3)$$

где  $\eta$  – коэффициент незавершенности.

Коэффициент  $\eta$  незавершенности теплообмена для крупнодисперсного сыпучего материала определяется расчетным, либо экспериментальным путем для конкретного устройства. С учетом зависимости (3) система уравнений примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} Gc_M t_{M0} + Vc_B \eta t_{M2} = Gc_M t_{M1} + Vc_B \eta t_{M1} \\ Gc_M t_{M1} + Vc_B \eta t_{M3} = Gc_M t_{M2} + Vc_B \eta t_{M2} \\ Gc_M t_{M2} + Vc_B \eta t_{M4} = Gc_M t_{M3} + Vc_B \eta t_{M3} \\ \cdot \cdot \cdot \\ Gc_M t_{Mi-1} + Vc_B \eta t_{Mi+1} = Gc_M t_{Mi} + Vc_B \eta t_{Mi} \\ \cdot \cdot \cdot \\ Gc_M t_{Mn-1} + Vc_B \eta t_{M0} = Gc_M t_{Mn} + Vc_B \eta t_{Mn} \end{array} \right. \quad (4)$$

Линейная система  $n$  уравнений (4) содержит  $n$  неизвестных температур материала  $t_{M1}, t_{M2}, \dots, t_{Mi}, \dots, t_{Mn}$ , и может быть решена любым известным способом. Таким образом, будут найдены температуры сыпучего материала на выходе из каждой ступени. Затем с использованием соотношения (3) найдутся все температуры воздуха  $t_{e1}, t_{e2}, \dots, t_{ei}, \dots, t_{en}$  на выходе из каждой ступени.

Для удобства решения введем следующие обозначения:

$$a = Gc_M; \quad b = Vc_B \eta; \quad d = Vc_B.$$

Тогда система уравнений (4) для состоящих из разного количества ступеней примет соответствующий вид. В случае одной ступени температуры материала и воздуха на выходе из холодильника найдутся по зависимостям

$$t_{m1} = \frac{at_{m0} + dt_{b0}}{a+b} \text{ и } t_{b1} = \eta t_{m1}.$$

Двухступенчатый холодильник:

$$\begin{bmatrix} -(a+b) & b \\ a & -(a+b) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_{m1} \\ t_{m2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -at_{m0} \\ -dt_{b0} \end{bmatrix}.$$

Трехступенчатый холодильник:

$$\begin{bmatrix} -(a+b) & b & 0 \\ a & -(a+b) & b \\ 0 & a & -(a+b) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_{m1} \\ t_{m2} \\ t_{m3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -at_{m0} \\ 0 \\ -dt_{b0} \end{bmatrix}.$$

Далее не сложно обобщить на  $n$  ступеней. Температуры материала  $t_{m0}$  и воздуха  $t_{b0}$  на входе, а так же коэффициенты матрицы  $a$ ,  $b$ ,  $d$  известны. Из решения системы находится распределение температур материала на выходе из каждой ступени холодильника. Предложенная модель позволяет на стадии проектирования подобрать необходимое количество ступеней и холодильника и необходимый расход воздуха для охлаждения материала до заданной температуры.

На основе данного подхода было спроектировано и успешно эксплуатируется несколько противоточных холодильников сыпучего материала для различных задач. В качестве примера можно привести противоточный циклонный холодильник глинозема на циклонной печи кальцинации [8] и противоточный жалюзийный холодильник пропантов. Остановимся на данных примерах. На рис. 2 приведена фотография, поясняющая принцип работы лабораторного противоточного жалюзийного холодильника. Материал движется вниз по наклонным жалюзийным решеткам, а воздух движется вверх через решетки, охлаждая материал. Таким образом, реализуется противоточная трехступенчатая система охлаждения. На рис. 3 представлена фотография промышленного противоточного жалюзийного холодильника пропантов, работающего на заводах компании ООО «ФОРЭС».



Рис. 2 Противоточные холодильники с жалюзийными решетками. Движение материала в лабораторной модели



Рис. 3 Промышленный холодильник производительностью 17 т/ч



Определение необходимого расхода воздуха на охлаждение и выбор числа ступеней холодильника осуществлялся с использованием предложенной методики. На рис. 4 приведены расчетные конечные температуры материала и воздуха на выходе из трехступенчатого холодильника в зависимости от расхода воздуха. Температура материала и воздуха на входе были заданы  $t_{m0} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $t_{e0} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ , что соответствует данным промышленных испытаний трехступенчатого холодильника пропантов. Производительность холодильника составляла  $G = 17 \text{ т/ч}$ . Как показали данные измерений температур по отдельным ступеням, степень незавершенности процесса теплообмена была  $\eta = 0,8$ . Материал подавался с температурой  $240\text{--}270 \text{ }^\circ\text{C}$  и охлаждался до  $77\text{--}90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Расход воздуха на входе в холодильник составлял  $V = 15000\text{--}15500 \text{ м}^3/\text{ч}$ , температура воздуха на входе в холодильник  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Как следует из приведенного на рис. 4 графика, расчетные и опытные данные удовлетворительно согласуются между собой.

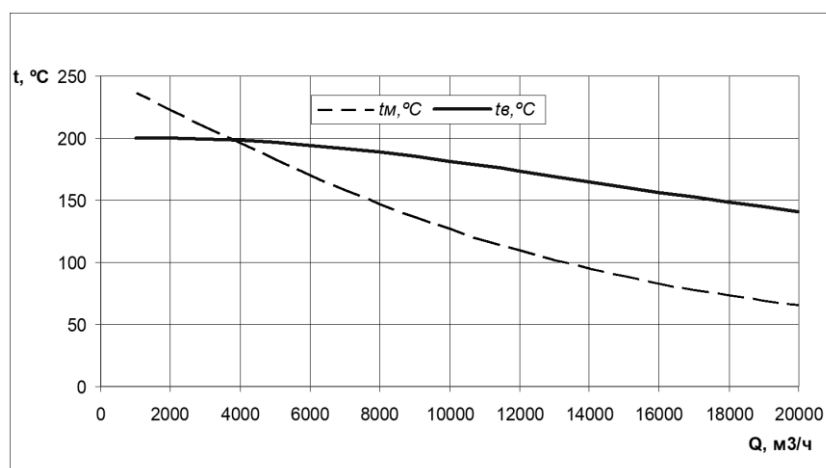


Рис. 4 Изменение температуры материала  $t_m$  и воздуха  $t_e$  на выходе холодильника

Температура воздуха на входе в холодильник  $t_{e0} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ , материала  $t_{m0} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ , производительность  $G = 17000 \text{ кг/ч}$ ,  $\eta = 0,8$ .

На рис. 5 показаны расчетные графики зависимости температуры материала и воздуха на выходе от числа ступеней теплообмена. Как следует из представленного графика, для охлаждения пропантов при заданных условиях достаточно трех ступеней.

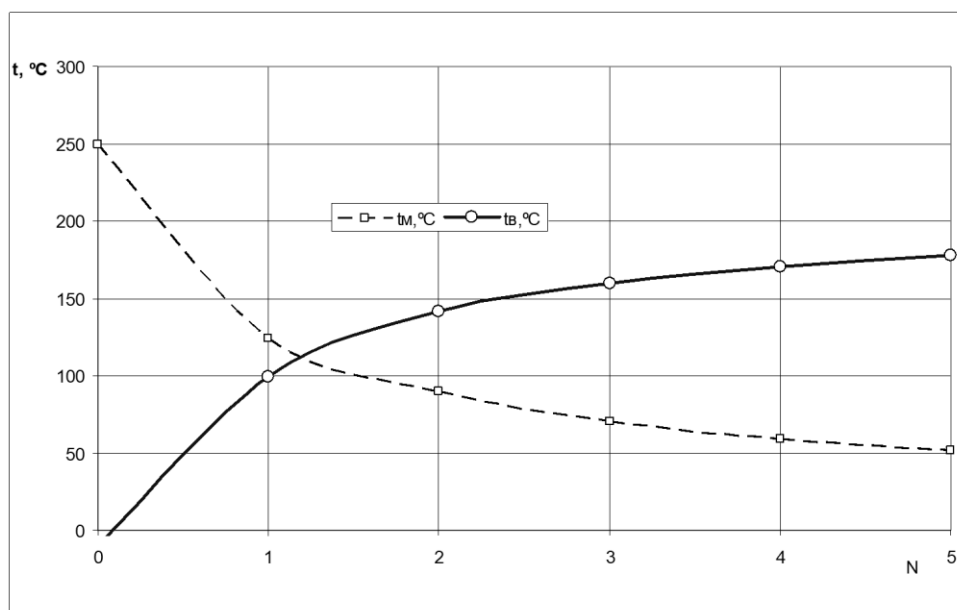


Рис. 5 Зависимость температуры материала и воздуха на выходе из холодильника от числа ступеней  $N$  охлаждения. Расход воздуха  $V = 15000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $G = 17 \text{ т/ч}$ ,  $t_{m0} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{e0} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\eta = 0,8$

Таким образом, предложенный метод расчета позволяет определить необходимое число ступеней и расход воздуха для охлаждения до заданной температуры. На основе предложенного метода были разработаны и внедрены ступенчатые противоточные холодильники с жалюзийными решетками. Такие аппараты и методику расчета можно использовать для подогрева материала перед подачей в печь. Это позволит утилизировать тепло отходящих дымовых газов.

#### Библиографический список

1. Fans M. Optimization of clinker cooler performance with understanding of the heat exchanger challenges / M. Fans // *Cement International*. 2017. Vol. 15(2). P. 56–61.
2. Touil D. Heat exchange modeling of a grate clinker cooler and entropy production analysis / D. Touil, H. Belabed, C. Frances, S. Belaadi // *International Journal of Heat and Technology*. 2005. Vol. 23(1). P. 61–68.
3. Taweel T. Analysis of Clinker Cooler in the Cement Industry Energy and Exergy / T. Taweel, E. Sokolova, V. Sergeev, D. Solovev // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 463 032101. 2018.
4. Mundhara P. Modeling of clinker cooler: Applications to Reduction in Energy Consumption. REPORT / P. Mundhara, S. Sharma // II year Chem. Eng. IIT MADRAS. – 2005.
5. Rasul M. Assessment of the thermal performance and energy conservation opportunities of a cement industry in Indonesia / M. Rasul, W. Widiyanto, B. Mohanty // *Applied Thermal Engineering*. 2005. Vol. 25. P. 50–65.
6. Anantharaman N. Energy Audit in Cement Industry (1500 tpd) / N. Anantharaman // *International Journal of Science Technology & Engineering*. 2017. Vol. 3(10). P. 12–18.
7. Ziya S. Mathematical Modeling of Heat Recovery from Rotary Kiln / S. Ziya, O. Zuhail, K. Hikmet // *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30. P. 817–825.
8. Шишкин С. Ф. Циклонная печь кальцинации / С. Ф. Шишкин // Новые огнеупоры. – 2015. – № 4. – С. 12–15.
9. Шишкин С. Ф. Решение инженерных задач в EXCEL : учебное пособие / С. Ф. Шишкин, А. С. Шишкин. – Екатеринбург : РИО УрФУ, 2012. – 365 с.
10. Шишкин А. С. Примеры расчетов аэродинамических процессов переработки сыпучих материалов в Excel / А. С. Шишкин, С. Ф. Шишкин // Учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург: Информационный портал УрФУ, 2016. 409 с. Режим доступа: [https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13462/1/Shishkin\\_Shishkin.pdf](https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13462/1/Shishkin_Shishkin.pdf).

# ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СУЛЬФАТНЫХ ФОРМ ЦИНКА ИЗ ШЛАМОВ АО «ЕВРАЗ НТМК» И ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОФЛЮСА ПОСЛЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦИНКА ИЗ ШЛАМОВ

**Шешуков Олег Юрьевич,**

E-Mail: [o.j.sheshukov@urfu.ru](mailto:o.j.sheshukov@urfu.ru),

Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук,  
Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург,

**Михеенков Михаил Аркадьевич,**

Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук,  
г. Екатеринбург,

**Некрасов Илья Владимирович,**

**Егиазарьян Денис Константинович,**

Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук,  
Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** В статье рассмотрена возможность извлечения сульфатных форм цинка из шламов АО «ЕВРАЗ НТМК» и последующей металлизации шламов.

**Ключевые слова.** Шлам, сульфат цинка, извлечение, металлизация.

Для извлечения цинка из пыли дуговых печей (ДСП) широко используется вельц-процесс, реализуемый во вращающихся [1] или кольцевых [2] печах. В пыли ДСП цинк находится в оксидной форме и его извлечение возможно выше температуры 1100 °С за счет восстановления оксида цинка до летучей металлической формы по реакции



Для оценки возможности удаления цинка из шламов АО «ЕВРАЗ НТМК», предприятие предоставило две пробы шламов – шлам доменного цеха и шлам аспирации пыли мартеновского цеха. Данные химического анализа представленных проб приведены в табл. 1. На рис. 1, 2 представлены данные фазового анализа исходных шламов.

Таблица 1

Химический состав шламов АО «ЕВРАЗ НТМК»

Наименование материала	Содержание в материале, масс. %									
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>общ</sub>	Zn	S	C
Шлам доменного цеха	6,9	6,2	0,3	2,2	0,37	0,7	55,2	5,1	1,1	9,8
Шлам мартеновского цеха	0,9	0,7	0,45	1,1	1,4	0,1	73,9	5,5	0,4	0

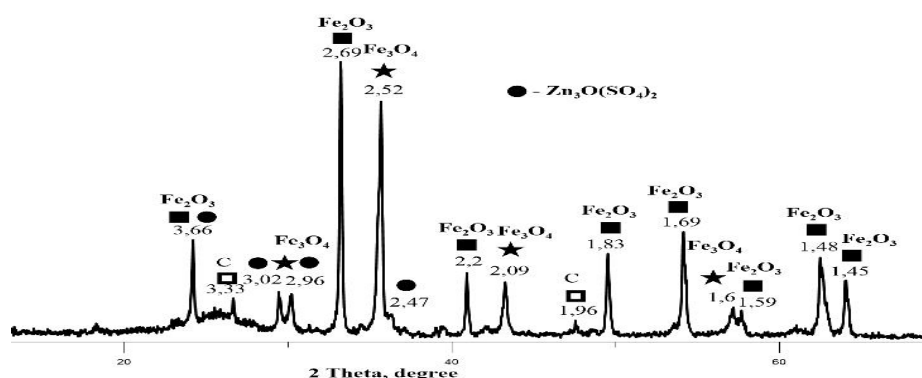


Рис. 1 Данные фазового анализа доменного шлама

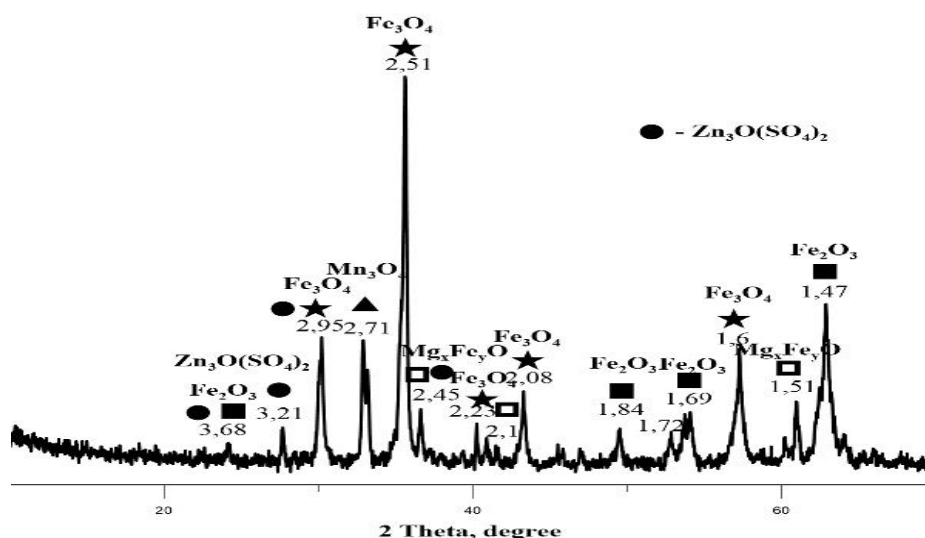
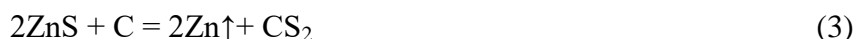


Рис. 2 Данные фазового анализа мартеновского шлама

По данным фазового анализа шламы в основном состоят из оксидов железа. Доменный шлам содержит углерод в виде кокса. Цинк в шламах присутствует в сложной сульфатной форме в виде  $ZnO(SO_4)_2$ . Извлечение таких форм цинка из шламов затруднено, поскольку в восстановительных условиях выше температуры  $100\text{ }^\circ\text{C}$  сульфатный цинк преобразуется в сульфидный по реакции

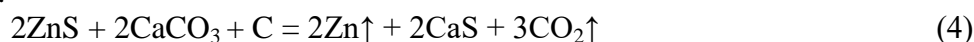


Восстановление сульфида цинка углеродом возможно по реакции



Результаты термодинамических расчетов свидетельствуют, что протекание реакции (3) возможно только выше температуры  $1900\text{ }^\circ\text{C}$ . Для реализации на практике подобной технологии потребуется использование специальных высокотемпературных агрегатов, что экономически нецелесообразно.

Нами, для преобразования сульфидной формы цинка в оксидную, предложено добавлять перед обжигом в сырьевую смесь известняк, магнезит или доломит [3, 4]. При использовании известняка для разложения сульфида цинка и его возгона, протекает следующая реакция:



Результаты термодинамических расчетов свидетельствуют, что протекание реакции (4) возможно выше температуры  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ .

Для определения возможности металлизации шламов и удаления цинков по разработанной технологии в шламы добавлялся известняк и кокс. Сырьевая смесь гомогенизировалась совместным помолом и прессовалась. Брикеты обжигались по отработанному режиму. Данные химического анализа продуктов обжига приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Химический состав шламов АО «ЕВРАЗ НТМК» после обжига

Наименование материала	Содержание в материале, масс. %									
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>общ</sub>	Zn	S	C
Шлам доменного цеха	19,9	20,7	4,8	5,9	0,18	0,7	50,5	0,14	2,7	0
Шлам мартеновского цеха	19,3	20,3	5,4	4,2	2,6	0,3	50,9	0,78	1,1	0

По данным химического анализа в продуктах обжига увеличилось содержание силикатных материалов, а железа – уменьшилось. Содержание цинка с 5 % снизилось до долей процента. Брикетты доменного шлама после обжига рассыпаются, а брикетты мартеновского шлама сохраняют форму и хорошо металлизуются. Данные фазового анализа мартеновского шлама после обжига приведены на рис 3.

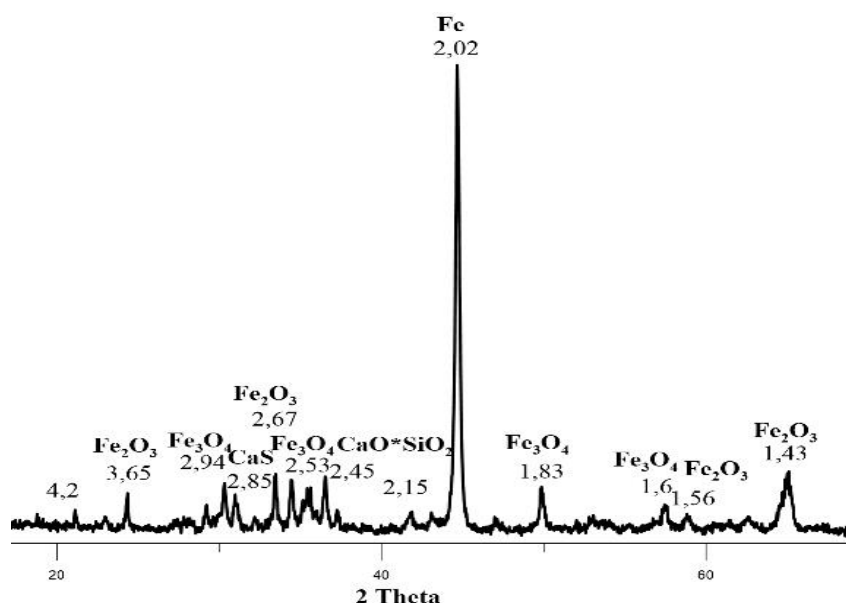


Рис. 3 Данные фазового анализа мартеновского шлама после обжига

По данным РФА, приведенным на рис. 3, видно, что продукты обжига содержат значительное количество металлического железа. Степень металлизации составила 72 %. Цинк в продуктах обжига отсутствует.

#### **Выводы**

Результаты испытаний свидетельствуют, что удаление цинка из шламов АО «ЕВРАЗ НТМК» с последующей их металлизацией возможно.

#### **Библиографический список**

1. Global steel dust. Waelz Kiln technology: [Электронный ресурс]. United States US Global Steel Dust Inc. 109 N. Post Oak Lane #415 Houston, TX 77024: [http://www.globalsteeldust.com/waelz\\_kiln\\_technology](http://www.globalsteeldust.com/waelz_kiln_technology).
2. ZincOx. Korean Recycling Plant: [Электронный ресурс]. Crown House, High Street Hartley Wintney Hampshire RG27 8NW United Kingdom: <https://zinc-ox.com/korean-recycling-plant/>.
3. Михеенков М. А. Технологические основы переработки сульфидной формы цинка из некоторых техногенных образований /М. А. Михеенков, О. Ю. Шешуков, И. В. Некрасов [и др.] // Сб. тезисов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. – Санкт Петербург, том 3, с. 80.
4. Михеенков М. А. Оценка возможности комплексной переработки техногенных образований, содержащих сульфид цинка / М. А. Михеенков, О. Ю. Шешуков, И. В. Некрасов [и др.] // Труды конгресса с международным участием и конференции молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований»: «ТЕХНОГЕН 2019». – Екатеринбург : УрО РАН, 2019. – с. 368–372.

## СНИЖЕНИЕ ОПАСНОСТИ КАРБОНИТРИДООБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИОКСИДА ТИТАНА В ШИХТЕ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ АО «ЕВРАЗ НТМК»

**Шешуков Олег Юрьевич,**

E-Mail: [o.j.sheshukov@urfu.ru](mailto:o.j.sheshukov@urfu.ru),

Институт металлургии УрО РАН,  
Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург,

**Михеенков Михаил Аркадьевич,**

Институт металлургии УрО РАН,  
г. Екатеринбург,

**Некрасов Илья Владимирович,**

**Егиазарьян Денис Константинович,**

**Ведмидь Лариса Борисовна,**

Институт металлургии УрО РАН,  
Уральский федеральный университет,  
г. Екатеринбург

**Аннотация.** В статье рассмотрена возможность снижения карбонитридообразования в доменных печах АО «ЕВРАЗ НТМК» в условиях повышения содержания титана в исходной руде.

**Ключевые слова.** Диоксид титана, карбид титана, нитрид титана, перовскит.

В настоящее время АО «ЕВРАЗ НТМК» перерабатывает титаномагнетиты Гусевогорского месторождения. В ближайшее время намечается разработка собственно Качканарского месторождения с переработкой его руд [1].

В табл. 1, по данным [1] приведен сравнительный химический состав исходной руды и концентратов ванадийсодержащих месторождений Урала.

Таблица 1  
Химический состав исходной руды и концентратов некоторых ванадийсодержащих месторождений Урала

Месторождение	Содержание, масс. %					
	Исходная руда			Концентрат		
	Fe	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
Гусевогорское	16,6	0,13	1,23	61,5	0,59	2,50
Качканарское	16,6	0,14	1,24	63,0	0,60	3,60
Медведевское	24,0	0,25	7,00	60,0	0,7–0,8	10,15
Копанское	36,7	0,45	9,90	54 60	0,7–0,9	8,13

В соответствии с приведенными в таблице данными после перехода комбината на концентрат Качканарского месторождения содержание TiO<sub>2</sub> в нем возрастет с 2,5 до 3,6 %. По данным той же работы Институтом металлургии УрО РАН выполнены расчеты доменной плавки окискованных концентратов Гусевогорского и собственно Качканарского месторождений по технологии АО «ЕВРАЗ НТМК», приведенные на рис. 1 и в табл. 2. В соответствии с приведенными данными содержание TiO<sub>2</sub> в шлаке возрастет с 10,53 % до 14,92 %.

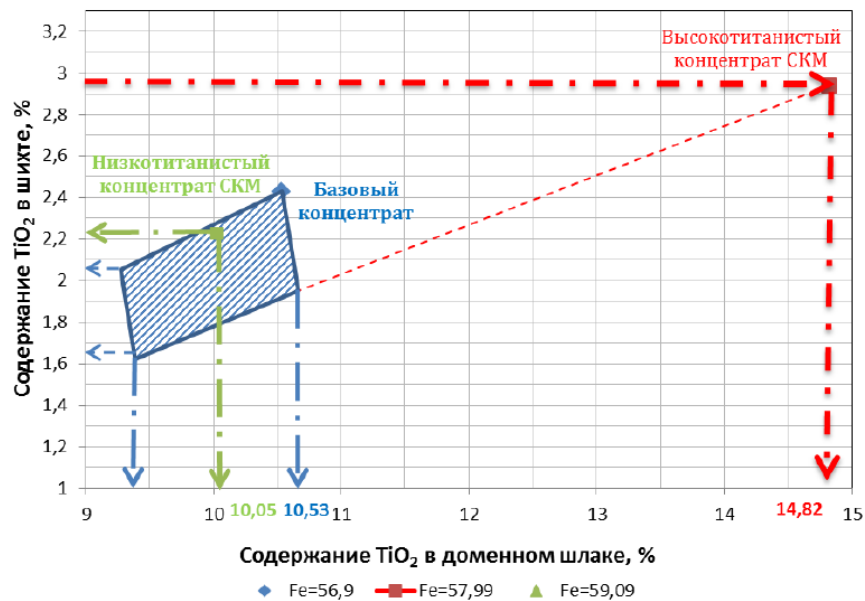


Рис. 1 Оценка влияния содержания  $TiO_2$  в доменной шихте на содержание  $TiO_2$  в шлаке

Таблица 2  
Влияния содержания  $TiO_2$  в доменной шихте на содержание  $TiO_2$  в шлаке

Показатель	Базовый концентрат (Гусевогорское месторождение)	Высокотитанистый концентрат (СКМ, Главный карьер)	Низкотитанистый концентрат (СКМ, Западный карьер)
Доменная шихта			
Агломерат в/о, доля %	38,3	38,3	38,3
Окатыши, доля %	52,3	52,3	52,3
Железофлюс, доля %	9,4	9,4	9,4
$Fe_{\text{общ}}$ , %	56,9	57,99	59,09
$TiO_2$ , %	2,43	2,94	2,25
Доменный шлак			
$TiO_2$ , %	10,53	14,92	10,05

В табл. 3 приведен сравнительный химический состав титанистых доменных шлаков АО «ЕВРАЗ НТМК» по данным 2016 г. и прогноз при переходе на высоко-титанистое сырье.

Таблица 3  
Химический состав доменного шлака в настоящее время  
и прогноз при переходе на высоко-титанистое сырье

Наименование доменного шлака	Содержание, масс. %								Основ- ность*
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
Доменный шлак АО «ЕВРАЗ- НТМК», штатная технология (2016 г.)	32,75	27,06	15,12	0,63	10,37	13,72	0,6	0,24	1,21
Доменный шлак АО «ЕВРАЗ- НТМК» (прогноз)	31,60	26,70	14,70	0,60	14,40	11,40	0,40	0,16	1,18

\*—CaO/SiO<sub>2</sub>

На диаграмме состояния CaO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> при содержании Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> близком к 20 %, приведенной на рис. 2, составы доменных шлаков АО «ЕВРАЗ-НТМК» в настоящее время располагаются в области А, а при увеличении содержания диоксида титана в шлаке, сместятся в область В.

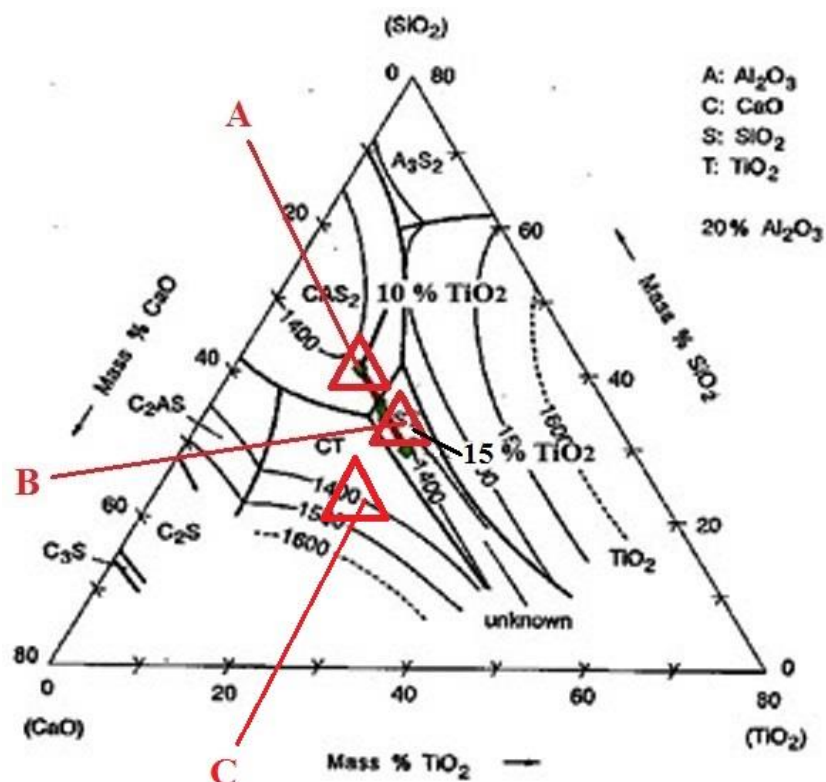


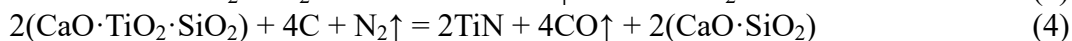
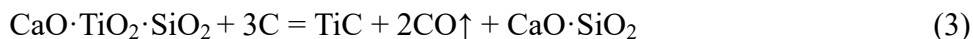
Рис. 2 Диаграмма состояния CaO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>

В области А фазовый состав шлака представлен анортитом (CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) и диоксидом титана в виде TiO<sub>2</sub>. Из титана в такой форме карбонитридообразование протекает по реакциям:



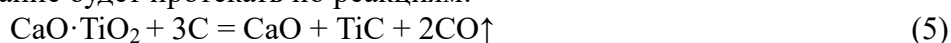
Термодинамические расчеты свидетельствуют, что протекание реакции (1) возможно начиная с температуры 1300 °С, а реакции (2) – с температуры 1200 °С.

При перемещении составов шлаков в область В, диоксид титана преобразуется в сфен (CaO·TiO<sub>2</sub>·SiO<sub>2</sub>), образование карбонитридов титана из которого возможно по реакциям:



При этом опасность карбонитридообразования сохраняется, поскольку согласно термодинамическим расчетам возможность начала образования карбонитридов титана по реакциям (3) и (4) смещается в область высоких температур всего на 100 °С (реакция (3) – 1400 °С, а реакция (4) – 1300 °С).

Для снижения опасности карбонитридообразования предлагается на стадии агломерации преобразовывать диоксид титана в перовскит (CaO·TiO<sub>2</sub>), при этом карбонитридообразование будет протекать по реакциям:



Протекание реакций (5) и (6) возможно только выше температуры 1600 °С, т. е. карбонитридообразование сместится в фурменную зону доменных печей, где оно играет положительную роль при формировании огнеупорного гарнисажа.



При этом у доменных шлаков АО «ЕВРАЗ-НТМК» повысится основность, и они сместятся в область С (рис. 2) существования перовскита. Повышение основности шлаков приведет к возрастанию температуры их плавления и гетерогенности, что может оказать негативное влияние на доменный процесс.

В работе [2] указывается, что для предотвращения карбидообразования, доменные шлаки должны содержать оксиды марганца, которые разрушают карбиды титана по реакции



В той же работе отмечается, что эффективность действия MnO на предотвращение карбидообразования титана может быть дополнительно повышена путем снижения вязкости шлака. Это возможно путем дополнительного ввода в шихту разжижающих добавок, например, борсодержащих.

Нами, совместно с АО «ЕВРАЗ-НТМК», проведены испытания по замене при агломерации известняка шлаками внепечной обработки стали (ВОС), которые показали, что замена известняка шлаком ВОС позволяет:

- увеличить удельную производительность агломашин на 4,3 %;
- увеличить показатель прочности  $B_{+5 \text{ мм}}$  – на 0,3 %;
- снизить расход коксовой мелочи на 10 %.

Однако данные испытания выявили недостатки такого способа. Шлаки ВОС содержат значительное количество корольков и крупных скрапин металла, которые затрудняют их введение в агломерат.

Нами разработаны способы комплексной стабилизации шлаков ВОС [3], которые в случае использования борсодержащих добавок позволяют не только стабилизировать шлак, но и снизить его вязкость, за счет чего такой шлак будет содержать меньше запутавшихся в нем корольков металла. Предлагается использовать обработанный шлак при агломерации. Одновременно с преобразованием диоксида титана в перовскит, эта мера позволит понизить вязкость шлака и его гетерогенность.

### **Выводы**

Предлагаемая технология затрагивает три передела АО «ЕВРАЗ-НТМК» – внепечную обработку стали, агломерацию и доменный процесс и позволяет снизить опасность карбонитридообразования при переходе комбината на высокотитанистое сырье.

### **Библиографический список**

1. Петухов Р. В. Металлургическая оценка руд и концентратов Качканарского месторождения : сборник трудов конференции / Р. В. Петухов, А. Н. Дмитриев [и др.] // Творческое наследие Грум-Гржимайло. – Екатеринбург, 2014. – С. 90–95.
2. Тлеугабдулов Б. С. Совершенствование шлакового режима доменной плавки за счет использования модифицирующих добавок : автореферат диссертации, 2009.
3. Шешуков О. Ю. Вопросы утилизации рафинировочных шлаков сталеплавильного производства / О. Ю. Шешуков, И. В. Некрасов, Д. К. Егизарьян [и др.]. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2015. – 153 с.

*Научное электронное текстовое издание*

## **ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МЕТАЛЛУРГИЯ**

Материалы международной научно-технической конференции

18–19 июня 2020 года

Разрешено к публикации 11.11.2020

Электронный формат – *pdf*

Объем – 23,38 уч.-изд. л.

Ресурсный информационно-образовательный центр  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина  
Нижнетагильский технологический институт (филиал)  
622031, г. Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 59

Информационный сайт НТИ (филиал) УрФУ  
<http://nti.urfu.ru>