

**I
ТОМ**



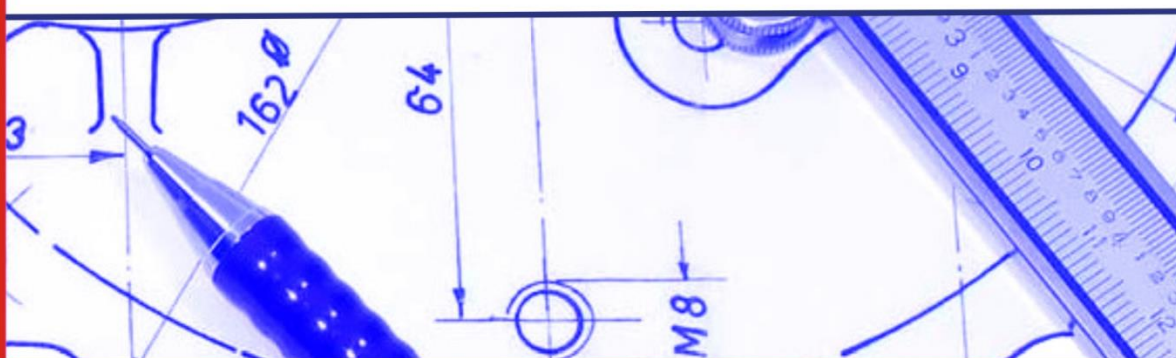
**НИЖНЕТАГИЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИИ



**НАУКА-ОБРАЗОВАНИЕ-ПРОИЗВОДСТВО:
опыт и перспективы развития**

Сборник материалов
XIV международной научно-технической конференции,
посвященной памяти Е. Г. Зудова



8-9 февраля
Нижний Тагил
2018



Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
Нижнетагильский технологический институт (филиал)

**«НАУКА – ОБРАЗОВАНИЕ – ПРОИЗВОДСТВО:
опыт и перспективы развития»**
8–9 февраля 2018 года

Материалы
XIV Международной научно-технической конференции,
посвященной памяти доктора технических наук,
профессора Е. Г. Зудова

В двух томах

ТОМ 1

Горно-металлургическое производство
Машиностроение и металлообработка

Нижний Тагил
2018

УДК 378
ББК Ч21
Н34

Ответственные редакторы:
канд. техн. наук, доцент М. В. Миронова,
канд. экон. наук А. А. Пыстогов

Н34 НАУКА – ОБРАЗОВАНИЕ – ПРОИЗВОДСТВО : Опыт и перспективы развития : мат-лы XIV Международной науч.-техн. конф. (8–9 февраля 2018 г.) : в 2 т. Т. 1 ; М-во образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. – 252 с.
ISBN 978-5-9544-0088-5 (м. 1)
ISBN 978-5-9544-0087-8

В сборник вошли труды представителей научных школ НТИ (филиала) УрФУ и других университетов России, Казахстана и Белоруссии, а также молодых ученых и специалистов предприятий по широкому кругу вопросов металлургии, машиностроения, строительства, химических, информационных технологий и экономики. Неординарность подходов к решению научных и практических задач, новизна и актуальность тематики придают изданию особую значимость для широкого круга лиц, интересующихся проблемами науки, образования и производства.

УДК 378
ББК Ч21

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

Научное издание

**«НАУКА – ОБРАЗОВАНИЕ – ПРОИЗВОДСТВО:
опыт и перспективы развития»**
8–9 февраля 2018 года

*Материалы XIV Международной научно-технической конференции,
посвященной памяти доктора технических наук, профессора Е. Г. Зудова*

В двух томах

ТОМ 1

**Горно-металлургическое производство
Машиностроение и металлообработка**

Подписано к печати 15.03.2018. Формат 60×90 1/16
Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Ризография
Усл. печ. л. 15,81. Уч.-изд. л. 17,83. Тираж 70 экз. Заказ № 2039

Ресурсный информационно-образовательный центр
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
Нижнетагильский технологический институт (филиал)
622031, г. Нижний Тагил, ул. Красногвардейская, 59

Отпечатано в ОБИР НТИ (филиал) УрФУ

ISBN 978-5-9544-0088-5 (м. 1)
ISBN 978-5-9544-0087-8

© Авторы статей, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Пегашкин В. Ф.</i> Человек, с которого берут пример.....	6
<i>Носов С. К.</i>	10
<i>Кортюв С. В.</i>	11
<i>Сандлер Д. Г.</i>	13
<i>Ефименко Ю. В.</i> Инвестиции бизнеса в качество трудовых ресурсов Н. Тагила.....	15
<i>Рыбакова Е. Е.</i> Формирование целевого капитала им. Е. Г. Зудова как инструмент развития НТИ (филиала) УрФУ.....	18
<i>Тлеугабулов С. М.</i> Состояние и перспективы развития металлургии железа и стали.....	19
<i>Соколов Б. Я.</i>	25
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО.....	28
<i>Бахарев М. А., Пыхтеева К. Б.</i> Необходимость установки дополнительного агрегата «печь-ковш» на АО «НПК «Уралвагонзавод»	28
<i>Белозеров Л. С., Казин А. А., Купцов С. Г., Плещев В. П., Магомедова Р. С.</i> Упрочнение стали 09Г2С карбидоборидом электроискровым и лазерным способами...32	32
<i>Волков Д. Н., Мамонов А. Л., Кормина И. В., Шатохин Д. А., Парфенов А. А.</i> Использование полимерного связующего в агломерации.....	37
<i>Володина Ю. В.</i> Галлий в рудах Качканара и перспективы его использования.....	48
<i>Горшкова О. С., Матюхин В. И.</i> Выбор конструктивных параметров роторной печи для сушки и обезмасливания угле- родсодержащих материалов и прокатной окалины.....	51
<i>Грузман В. М., Вавилов Е. А.</i> Исследование необходимости замены мартеновского передела на электродуговой.....	54
<i>Зеленукин А. В., Пыхтеева К. Б., Тлеугабулов Б. С.</i> Методы рационального режима загрузки доменных печей, оборудованных БЗУ.....	56
<i>Ильиных Р. А., Богатов А. А.</i> Анализ влияния режима предварительной штамповки на формоизменение и энергоси- ловые параметры чистовой штамповки цельнокатаных колес с помощью компьютерно- го моделирования в программном комплексе <i>Deform 3d</i>	63
<i>Казин А. А., Белозеров Л. С., Плещев В. П., Купцов С. Г., Магомедова Р. С.</i> Исследование упрочнения карбидоборидом алюминиевого сплава АЛ-9 электроискровым и лазерным способами.....	67
<i>Козырь А. Н.</i> Новая концепция развития технологии переработки продуктов коксования на Коксохимическом предприятии АО «ЕВРАЗ НТМК»	73
<i>Матюхин В. И., Ямшанова Н. В., Матюхина А. В., Мейстер Т. А.</i> Технологические особенности сушки каменного угля марки Д.....	82
<i>Метелкин А. А., Кабанов В. Д., Астафьев Г. И., Кабанов Д. В.</i> Моделирование процесса движения расплава в системе циркуляционный вакууматор-сталеразливочный ковш в металлургическом производстве	91

<i>Миронов К. В., Михалев В. А., Тлеугабулов Б. С.</i>	
Влияние условий плавки на характер движения материалов в доменной печи.....	94
<i>Половец М. В., Тлеугабулов Б. С.</i>	
Использование нефтекоса в составе пылеугольного топлива для доменной плавки...102	
<i>Рубцов В. Ю., Шевченко О. И.</i>	
Возможность использования ассиметричных валков шаропрокатных станов для получения устойчивого режима прокатки.....	106
<i>Сазонова Е. А, Трапезников Ю. Ф.</i>	
Образование вредных соединений в сточных водах газоочисток.....	112
<i>Тлеугабулов С. М., Тажиев Е. Б.</i>	
Теоретические основы восстановительной плавки стали.....	116
<i>Трекин Г. Е., Шевченко О. И.</i>	
Разработка регистратора температуры для металлургического эксперимента.....	123
<i>Фирстов А. П.</i>	
Молекулярная структура жидкого стекла.....	126
<i>Шешуков О. Ю., Некрасов И. В., Метелкин А. А., Коротков Ю. Н.</i>	
Приемы повышения стойкости футеровки агрегатов ковшовой обработки стали.....	130
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА.....	134
<i>Сафонов Е. Н., Шумяков В. И.</i>	
К восьмидесятилетию со дня рождения доцента И. А. Толстова.....	134
<i>Анахов С. В.</i>	
Методические основы расчета и проектирования металлорежущих плазмотронов	139
<i>Байнов А. А., Фирстов С.В.</i>	
Применение ревитализанта «РВС-ИПИ» для восстановления механических пар трения.....	145
<i>Боршова Л. В.</i>	
Выбор предельной глубины резания при точении поверхности переменного профиля.....	156
<i>Голиков Н. И., Сидоров М. М., Максимова Е. М., Сараев Ю. Н.</i>	
Исследование микроструктуры сварных соединений, выполненных в условиях отрицательных температур.....	161
<i>Гуднев В. Н.</i>	
Горелки для дуговой сварки в защитных газах плавящимся электродом.....	165
<i>Дегтянникова В. А.</i>	
Моделирование технологических процессов.....	169
<i>Кукина Н. Ю.</i>	
Выбор средств измерения и контроль размеров деталей.....	171
<i>Макеев С. В., Буйленков П. М.</i>	
Особенности расчета напряженно-деформированного состояния танка-контейнера с учетом реального нагружения в эксплуатации.....	174
<i>Пегашкин В. Ф., Боршова Л. В.</i>	
Шероховатость поверхности после окраски.....	185

<i>Пегашкин В. Ф., Пегашкина Е. В.</i>	
Нелинейная аппроксимация переменной глубины резания.....	188
<i>Пегашкин В. Ф., Старостин А. П.</i>	
Определение деформаций технологической системы при обработке деталей переменного по длине профиля.....	194
<i>Сенько В. И., Макеев С. В., Комиссаров В. В.</i>	
Методические основы определения коэффициента запаса сопротивления усталости при натуральных испытаниях подвижного состава.....	201
<i>Сидоров В. П.</i>	
О стабильности времени расплавления электрода как критерия навыка сварщика.....	212
<i>Сидоров В. П., Мельзитдинова А. В.</i>	
Регулирование проплавления при сварке с учетом отклонения дуги от стыка.....	220
<i>Скочилор П. Н.</i>	
Исследование процесса захолаживания криогенных сосудов.....	229
<i>Христенко Ю. А., Черемных О. Я., Белов В. В., Бусыгин О. В.</i>	
Энергетическая инфраструктура обеспечения сжиженным природным газом Удаленных от развитых сетей газотрубопроводов потребителей.....	233
<i>Черемных О. Я.</i>	
Анализ особенностей транспортирования на экспорт сжиженного природного газа и совершенствование конструкции контейнера-цистерны.....	243
<i>Чистов Д. И., Пыстогов А. А.</i>	
Решение практических задач в области разработки альтернативного нефтяного оборудования.....	250

Человек, с которого берут пример

Пегашкин В. Ф., д-р техн. наук, проф.
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Статья посвящена Евгению Георгиевичу Зудову, доктору технических наук, профессору, почетному гражданину Нижнего Тагила, 20 лет возглавлявшему Нижнетагильский технологический институт Уральского федерального университета.

Ключевые слова: люди науки.

Из почти 75-летней истории Нижнетагильского технологического института два десятилетия им руководил Евгений Георгиевич Зудов, доктор технических наук, профессор, почетный гражданин Нижнего Тагила, академик 5 международных и Российских общественных академий, Лауреат премии Совета Министров СССР, кавалер ордена Почета, награжден медалью им. Черепановых, автор 5 монографий, около 150 научных публикаций и авторских свидетельств на изобретения.

Ему удалось многое: сделать головокружительную карьеру, подняться на небывалую высоту Нижнетагильский технологический институт, добиться крупных научных достижений, воспитать трех дочерей. Чтобы описать такую яркую и насыщенную жизнь, не хватит и целой книги.

Евгений Георгиевич Зудов родился в 1939 году в городе Нижний Тагил. Свою трудовую деятельность начал в 1959 году рабочим на Нижнетагильском металлургическом комбинате. С 1966 года, после окончания Уральского политехнического института, Евгений Георгиевич работал старшим инженером, руководителем экспериментальной группы, заместителем начальника лаборатории прокатного производства центральной лаборатории комбината.

Талантливому исследователю Зудова моментально вовлекли в совет молодых специалистов НТМК, а позднее избрали председателем. В то время большое значение предавалось техническому творчеству молодежи. Был организован Городской совет ученых и специалистов по различным секциям: металлургическая, машиностроительная, химическая... Частые поездки на технические конференции в другие города вплоть до Сибири и Дальнего Востока, слеты молодых специалистов. В этой среде и начал путь большой ученый Евгений Зудов. И главное, все, что он делал, было тесно связано с производством, с проблемами его родного комбината. Какие бы вопросы ни возникали, они тут же исследовались, а найденные решения внедрялись. Евгений Георгиевич продолжал свои научные изыскания и успешно защитил кандидатскую диссертацию.

Одним из ярких моментов в жизни Евгения Зудова оказалась командировка в Японию в качестве специалиста от Министерства черной металлургии. Много полезного и интересного привез с собой молодой ученый из Японии. Сделал большой доклад обо всех новшествах на техническом совете Министерства черной металлургии тогда еще Советского Союза. Многие идеи, которые он почерпнул в Японии, впоследствии пытался

внедрить на комбинате. Зудова поразила система контроля качества, которую использовали японцы: она опережала мировые аналоги на десятки лет.



Евгений Георгиевич Зудов

1984 год – новая страница в биографии этого талантливое человека. Евгений Георгиевич назначен директором Нижнетагильского филиала Уральского политехнического института.

Зудов сразу же поставил перед собой две основные задачи: объединить коллектив, превратив его в работоспособную команду, и укрепить связь с предприятиями, развивая материально-техническую базу. Удалось ему привлечь в вуз ученые умы с УВЗ и НТМК. Преподавательский состав института, взяв пример с нового директора, серьезно взялся за науку, и появились свои не только кандидаты наук, но и доктора, профессора, академики. Всего же в Нижнетагильском техническом вузе на тот момент появилось 12 новых кафедр, в том числе военная, а также – физкультуры и спорта.

Евгений Георгиевич гордился победами своих студентов. Да и сам он частенько предпринимал лыжные прогулки по трассе застывшего зимой Тагильского пруда, благо, что от его дома до лыжни было рукой подать. Он не просто любил спорт. Евгений Георгиевич оставил после себя спортивный комплекс УГТУ-УПИ «Металлург-Форум». Эта идея требовала огромной работы, и директор вуза подключил к ней многие предприятия и организации города. К строительству приступили в начале 1999 года.

Шаг за шагом директор превратил тагильский филиал в достойный нашего города технический вуз. В 1996 году филиал получил признание – статус института в составе УГТУ-УПИ. Зудову удалось значительно укрепить материально-техническую базу вуза: построить комфортабельное общежитие и третий учебный корпус, открыть десятки новых лабораторий.

В 1989 г. по инициативе Евгения Георгиевича создано Нижнетагильское территориальное межотраслевое учебно-научно-производственное

объединение «Политехник», сблизившее институт и техникумы города с предприятиями города. Идея по тем временам была новаторской, ориентир был взят на подготовку специалистов по требованию заказчиков.

За время своей 30-летней научной деятельности Евгений Георгиевич опубликовал четыре монографии и более 150 научных статей. Он становился лауреатом премии Совета Министров СССР за работы в области металлургического производства. Награжден знаком «Отличник высшей школы СССР», медалью фонда им. Черепановых. За заслуги перед государством, многолетний добросовестный труд и большой вклад в укрепление дружбы и сотрудничества между народами - орденом Почета.

Среди учеников академика Зудова были один доктор и четыре кандидата технических наук. Выпускники его вуза составляют элиту технической интеллигенции Нижнего Тагила. Имена многих хорошо известны в нашем городе: Н. А. Малых, А. Э. Гердт, А. К. Зюков, В. Т. Руденко, Н. Н. Диденко.

Профессор Зудов был хорошо известен как крупный специалист в области теории и инженерных методов управления качеством продукции, математического моделирования и управления в инженерной деятельности. В частности, профессором Зудовым разработана комплексная система управления качеством продукции на Нижнетагильском металлургическом комбинате, позволившая когда-то сэкономить предприятию миллионы рублей.

В 1988 г. Е.Г. Зудов защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Ему последовали коллеги и к 2002 г. число докторов наук выросло до 12, а кандидатов наук стало 44.

Сфера интересов Евгения Георгиевича постоянно расширялась, а объем работ увеличивался. С 1991 г. он возглавил созданную им кафедру экономики и управления в промышленности.

За 20 лет его деятельности в институте было организовано 12 новых кафедр, а кроме того – филиалы выпускающих кафедр на УВЗ, НТМК, Уралхимпласте, Уралкриомаше.

Без укрепления современной технической базы институт не может решать поставленные перед ним задачи. В 1989 году на основе лаборатории вычислительной техники был создан Центр информационных технологий, в составе которого организован Городской компьютерный центр для обучения студентов и школьников.

Компьютеризация вуза дала возможность студентам создавать свою газету. Евгений Георгиевич активно поддержал их инициативу. Так же, как и студенческую команду КВН, студенческий радиоцентр. При его поддержке была создана баскетбольная команда, успешно выступающая на соревнованиях различного уровня.

Был организован шахматный клуб «Политехник», объединяющий любителей этой древней игры. Шахматистам приходилось сталкиваться с различными проблемами. Возникали моменты, когда собственных сил

и средств было не достаточно для их решения. Евгением Георгиевич всегда был в курсе всех событий и прилагал усилия для оказания всесторонней поддержки, будь то консультации по различным вопросам, помощь в организации поездок команды клуба на соревнования, приобретения шахматного инвентаря и многое другое. Всегда чувствовалось его доброжелательное отношение, заинтересованность, профессиональное отношение к делу. Евгением Георгиевич долгое время возглавлял Шахматную федерацию Нижнего Тагила.

Итоги эпохи Зудова впечатляют: институт подготовил 12 тысяч специалистов. И, несомненно, большая роль в этом принадлежит Евгению Георгиевичу Зудову, – выпускники его вуза составляют элиту технической интеллигенции Нижнего Тагила.

Время не властно над людской памятью. И те, с кем работал и кого учил Евгений Георгиевич, никогда не забудут этого удивительного человека.

Владислав Потанин, ученик Е.Г. Зудова, директор НТИ (филиал) УрФУ: «Евгений Георгиевич всеми силами продвигал молодежь, готовил ребят к чему-то большему. Он всегда старался помочь своим ученикам и в защитах, и в аспирантуре, а затем в продвижении по карьерной лестнице. Это действительно был великий человек, доктор, профессор, академик. Мы ему очень благодарны, мы чтим его память, мы его помним, мы его любим».

Сергей Докучаев, заведующий кафедрой гуманитарного и социально-экономического образования НТИ (филиал) УрФУ: «Евгений Георгиевич Зудов запомнился веселым, жизнерадостным и очень энергичным человеком. Еще одно его качество – это человечность. Он часто узнавал у людей, как их дела, общался с ними неформально, по-дружески. У него было умение разбираться в людях, он грамотно подбирал кадры, поэтому институт активно взаимодействовал с предприятиями города, тесно с ними сотрудничал».

Екатерина Рыбакова, дочь Е.Г. Зудова, сооснователь «Рыбаков Фонда»: «В своей работе Евгений Георгиевич больше всего ценил возможность общаться со студентами. Он очень любил студентов, и его вдохновляло их познавательное любопытство и творчество. Студенты любили его в ответ, и до сих пор его ученики вспоминают о нем, как о своем учителе с большой буквы, говорят о нем с теплом и благодарностью».

Светлана Зудова, вдова Е.Г. Зудова: «Мы сейчас много говорим об онлайн образовании, как о новой форме обучения, а я вспоминаю сейчас, как Евгений Георгиевич в 90-х поступил в Открытый британский университет, где в то время уже была онлайн форма обучения. Это было удивительно, – он сам поступил в 50 с лишним лет и потянул за собой нескольких преподавателей. Он всегда тянул за собой сотрудников – создал научно-производственное объединение в институте, в тяжелые, безденежные времена организовал крепкие связи с предприятиями, с руководством города. И, самое удивительное, что все шли ему навстречу. Он умел так убеждать, донести важность, что все откликнулись».

Мне довелось работать с Евгением Георгиевичем и решать проблемы. Например, «Металлург-Форум», который появился благодаря сотрудничеству и идее Евгения Георгиевича, став примером взаимодействия градообразующего профильного предприятия и высшего учебного заведения. Хорошие времена были, давно это было, но самое главное – результат, который остается надолго. Это должны все помнить.

На долю Евгения Георгиевича, на его время, на его расцвет сил выпали 90-е годы – наиболее сложные для нас всех, для всей страны. Сегодня, правда, все критикуют наше поколение, но в действительности то, что выпало на нашу долю, трудно представить. Евгений Георгиевич сделал все, чтобы сохранить высшее образование. Он верил, что настанут времена, когда вспомнят, для чего был создан этот институт, в чем его предназначение, и он станет востребован страной.

Конечно, в те годы, в 90-е, о науке и разговоров не было: оборачиваясь назад, можно с болью смотреть на тот период, когда демократии и свободы много, а науки все меньше и меньше.

Я вижу сегодня в зале многих известных ученых, известных на весь мир, наших, уральских, ученых. И они могут со мной согласиться, что те идеи, которые зародились давным-давно остались нереализованными. Это тот багаж, то богатство, которое у нас сегодня есть. И обращаясь к молодежи, которая тоже сегодня собралась в этом зале, хочу сказать, что вам повезло заниматься наукой, потому что сегодня именно наука, ее достижения и ее развитие востребованы государством. Это звучит сегодня везде, и прежде всего об этом говорит президент. Я могу только повторить слова президента: молодежь должна быть дерзкой, без дерзости, в том числе и в науке, невозможно работать, потому что самые смелые идеи иногда сопоставимы только с дерзостью. Поэтому молодежи можно только посоветовать – дерзайте!

Но наука и возможность работать в науке начинаются с фундаментального образования, прежде всего в школе. Знания, полученные в школе по многим базовым предметам, а если говорить о техническом вузе, то это химия, математика, физика, и если ты их знаешь хорошо, то и в институте учиться легче. Знания, которые дают в институте, одинаково пригодятся и на производстве, и в науке особенно. Теми фундаментальными знаниями, которые даются в институте, вы будете пользоваться как умением дышать, даже не замечая, откуда рождается та или иная идея, откуда берется то или иное утверждение.

Наука – это очень интересно, потому что даже на производстве без понимания и умения разговаривать на равных с ученым, невозможно руководить производством и обеспечивать на практике реализацию тех научных достижений, которые разрабатываются. А наша наука – металлургическая – прежде всего прикладная.

Без взаимодействия ученых и производителей движение государства вперед невозможно.

Я бы хотел, пользуясь случаем, отметить, что уральская наука, уральская инженерная школа, является основоположником множества открытий и технологий: машина непрерывной разливки – это наше, уральское, изобретение, а если говорить от теории к практике – это Нижнетагильский металлургический комбинат; конвертерное производство, первый конвертерный цех – это Нижний Тагил. Освоение ванадиевой плавки сначала в доменной печи, а потом уже в конвертере – это уникальнейшее достижение наших уральских ученых и металлургов-практиков. И этому достижению равных нет. Никто не смог найти такую по-настоящему эффективную технологию сначала в научных лабораторных исследованиях, а потом – в практическом внедрении.

Поэтому я хотел бы поздравить всех с Днем науки, пожелать успехов в ее развитии. Хотел бы надеяться, что бодрости духа у ветеранов не занимать, и они с удовольствием и желанием передадут и передают свои знания и умения начинающему поколению исследователей.

И я верю в то, что идеи, которые закладывал в развитие института Евгений Георгиевич Зудов, будут воплощены. И наш тагильский институт в рамках мощного Уральского университета будет и дальше успешно развиваться как самостоятельная единица машиностроительной и металлургической направленности и оставаться центром притяжения для молодежи не только Урала, но и всей страны.

Кортов С. В., д-р экон. наук, канд. физ.-мат. наук
Первый проректор УрФУ

Уважаемые участники конференции, уважаемые гости!

Разрешите от имени Уральского федерального университета, ректората, огромного коллектива студентов и сотрудников, частью которого является, безусловно, и Нижнетагильский институт, поздравить Вас с нашим профессиональным праздником – Днем науки, и, естественно, с открытием этой известной и знаменитой международной конференции.

Я уточню статус Нижнетагильского технологического института. Это не филиал, это структурное подразделение Уральского федерального университета с очень высоким уровнем автономии: собственными счетами, с собственными стратегиями развития, и мы надеемся, что именно та свобода для принятия решений и их реализации, которая сейчас имеется в Нижнетагильском институте, будет являться основой для его успешного развития и на благо науки, и на благо нашей страны, нашего региона, города Нижний Тагил.

Прежде всего, несколько слов о том, что современная наука стремительно меняется под воздействием тех технологических и культурных сдвигов, которые мы все наблюдаем. Сегодня говорят уже о промышлен-

ной революции, о культурной революции, т. е. слово «революция» входит в наш лексикон, и это очень большой вызов для всех нас, потому что революция ломает то, что казалось незыблемым, но с другой стороны, дает возможности там, где это казалось до настоящего времени невозможным.

И сегодня есть несколько таких правил, которые позволяют быть научной и образовательной организации конкурентоспособной. Прежде всего, это неразрывная связь между наукой фундаментальной и прикладной, технологиями и производством. Если эта связь нарушается хоть в одном звене, то погибает, прежде всего, наука, а потом производство и далее по цепочке. И если при организации научных исследований сразу не представлять, какую ценность, какую пользу это может иметь для технологического и индустриального, экономического развития, то такие исследования не будут востребованы.

Второе правило – это тесная интеграция образовательного, научного и инженерного процессов: если человек занимается только в аудитории, а не идет к исследовательским или производственным установкам и оборудованию, вряд ли он как человек, как человеческий капитал будет востребован.

И третье правило – это тесная интеграция университета, бизнеса и власти. Без этой интеграции ни один серьезный проект в современных условиях не развивается.

Сегодня будет обсуждаться стратегия развития Нижнетагильского института, и эти три правила должны быть положены в основу этой стратегии.

В этом зале я вижу все поколения, что очень важно: производственный и научный опыт, наработки технического и практического плана передаются от поколения к поколению.

Я с удовольствием посмотрел фильм о Евгении Георгиевиче и мне кажется, что все те принципы, о которых я сейчас говорил, были предусмотрены и, более того, использованы в развитии Нижнетагильского технологического института этим замечательным и великим человеком. И это наследство надо только развивать, преумножать, чтобы гордиться его результатами.

Я всем присутствующим желаю прекрасного дня, хорошей конференции, новых идей, дерзости, о которой уже сегодня говорилось, и результатов. Спасибо!

Позиционирование и стратегия развития НТИ как неотъемлемой части университета

Сандлер Д. Г., канд. экон. наук

Проректор по экономике и стратегическому развитию, УрФУ, Екатеринбург

Институт с 1944 года является филиалом и успешно осуществляет свою деятельность в рамках университета. Следуя потребностям рынка труда, запросам работодателей и вектору развития Университета, в 2016 году в НТИ (филиал) УрФУ произошли кардинальные перемены: принята программа развития, изменена структура филиала, ведется работа по взаимодействию с внешними производственными и образовательными партнерами, реализуется новая система профориентационной работы. Ежегодно расширяется перечень программ ВО, СПО. Ведется подготовка специалистов по 15 основным образовательным программам высшего образования, а также по 7 программ среднего профессионального образования. Внедряется новый формат инженерного образования: проектное обучение, открытое образование, модульность, индивидуальная траектория. В 2017 году лицензированы 2 специальности СПО, входящие в ТОП-50: Мехатроника и мобильная робототехника, Технология металлообрабатывающего производства и 6-ВО: Теплоэнергетика и теплотехника квалификация (бакалавр), Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств (магистр), Мехатроника и робототехника (магистр), Оружие и системы вооружения квалификация Исследователь, Преподаватель-исследователь, Химическая технология органических веществ квалификация Техник-технолог, Металлургия (магистр). Работают центры довузовской подготовки и дополнительного профессионального образования, СПО. Выпускники НТИ востребованы не только на предприятиях города, но и на предприятиях Уральского региона. Все это делает Нижнетагильский филиал привлекательным для молодежи и способствует его дальнейшему развитию. Со стороны университета большое внимание уделяется развитию материально-технической базы, научной и инновационной деятельности. Одним из значимых событий является проект «Разработка практикоориентированных образовательных программ в области производства специальных машин и устройств», в рамках проекта созданы две лаборатории, которые оснащены высокотехнологичным оборудованием на сумму более 14 млн руб.

Успешными примерами можно считать совместную деятельность с градообразующими предприятиями в рамках проектов: система подготовки кадров для ОПК, открытие базовой кафедры Машиностроение, ЦОК, бережливое производство, студенческое конструкторское бюро и т. п.

С 2014 года институт активно участвует в открытом публичном конкурсе на предоставление поддержки программ развития системы подготовки кадров для оборонно-промышленного комплекса в образовательных организациях высшего образования, подведомственных Министерству об-

разования и науки Российской Федерации (проекты по инфраструктурному обеспечению и по целевому обучению студентов). В рамках проекта приобретено современное высокотехнологичное оборудование и программное обеспечение на сумму более 41 млн руб., что позволило готовить выпускников нового поколения для предприятий ОПК и участвовать в различных конкурсах профессионального мастерства на уровне РФ и за рубежом. Также, совместно с УВЗ и Университетом, велась работа по разработке корпоративных стандартов и практикоориентированных образовательных программ.

Для градообразующих предприятий, таких как УВЗ, ЕВРАЗ НТМК, УКБТМ, НТИИМ, Уралхимпласт и других, институт готовит кадры и проводит целевую подготовку специалистов. В рамках дополнительного профессионального образования по заказу предприятий АО «ЕВРАЗ НТМК» и АО «НПК «Уралвагонзавод» за последние 5 лет прошли профессиональную переподготовку и повышение квалификации более 1000 человек (880 и 367 человек соответственно).

Организованы профильные классы «Школа – Вуз – Предприятие»: 5 школ и 8 классов

С 2017 года Институт активно участвует в организации и подготовке к чемпионатам *WorldSkills*, предоставляя свои площадки для проведения и готовя участников. Так на внутривузовском чемпионате *WorldSkills* студентка Института заняла первое место.

Система взаимодействия «Университет – Институт – Предприятие» показала свою эффективность как в плане подготовки персонала, так и в плане объединения ресурсов.

В НТИ создаются лаборатории, оснащенные современным оборудованием и программным обеспечением. Сейчас совместно с АО «ЕВРАЗ НТМК» реализуется проект «Конструкторское бюро». В 2016 году совместно с АО «НПК «Уралвагонзавод» в рамках проекта «Кадры для ОПК» создана Базовая кафедра «Машиностроение». Заключены договоры о взаимном сотрудничестве с предприятиями. Проводятся фундаментальные и прикладные исследования по направлениям развития науки и техники в машиностроении и металлургии, а также по новым перспективным направлениям робототехники.

Университет позиционирует Институт как один из ведущих образовательных и научных центров УрФО, способный обеспечить развитие экономики Урала путем модернизации существующих и создания новых производств на основе передовых научно-технологических разработок совместно с корпоративными партнерами.

Предлагаем совместно с администрацией города, университетом и институтом проработать вопрос по созданию центра компетенций «Наука – Технологии – Инновации» и учебно-производственной площадки для реализации концепции непрерывного образования.

Инвестиции бизнеса в качество трудовых ресурсов Нижнего Тагила

Ефименко Ю. В.

И. о. директора по персоналу АО «ЕВРАЗ НТМК»

На сегодняшний день сохраняется дисбаланс сферы труда и сферы образования. Заметна нехватка квалифицированных кадров на предприятиях нашего города, и в настоящее время АО «ЕВРАЗ НТМК» по техническим специальностям получает только 30 % от своей потребности в квалифицированных специалистах с высшим образованием.

По ряду специальностей в городе не готовят квалифицированных специалистов. Очевидна нехватка промышленных теплоэнергетиков, специалистов в области водоснабжения и водоотведения и промэлектроников. Приезд выпускников из других городов России незначительный. Основные причины сложившейся ситуации известны. Сохраняются приоритеты выпускников в области гуманитарных направлений, приоритет среди выпускников при сдаче ЕГЭ по обществознанию сохраняется четыре года подряд. Кроме этого 60 % выпускников нашего города предпочитают получать образование в других городах страны, а крайне низкий процент возврата способствует дефициту кадров в городе.

Только 30 % образовательных учреждений Нижнего Тагила оснащены современными классами и современными лабораториями для обеспечения качественной подготовки требуемых специалистов. В сложившейся ситуации АО «ЕВРАЗ НТМК» находит пути решения через инвестиции как в собственных сотрудников, так и в работников будущего, то есть в учащиеся школы, колледжей и студентов вузов.

Понимая, что формирование кадрового потенциала начинается с самого юного возраста, профориентационная работа АО «ЕВРАЗ НТМК» сегодня выстроена в формате шефской помощи. Комбинат шефствует над 34 детскими садами, 25 школами. На постоянной основе проводятся встречи со школьниками, организуются совместные спортивные мероприятия. В программу профориентации входит посещение учащимися структурных подразделений комбината и музейно-выставочного комплекса.

С 2016 года НТИ (филиал) УрФУ реализует проект создания профильных классов с шестью школами города «Школа – Вуз – Производство». Цель данного проекта – непрерывность общего и высшего образования, дополнительная подготовка наших выпускников по предметам информационно-технологического направления и создание благоприятных условий для научно-технического творчества, повышения интереса школьников к исследованиям, к изобретательству. Вклад АО «ЕВРАЗ НТМК» в этот проект – это развитие инженерных компетенций через тренинги на базе корпоративного учебного центра: тренеры проводят для школьников такие курсы, как «Теория решения изобретательских задач», «Алгоритм решения проблем (АРИП)», лево-тренинги; и гранты школам

на современное оборудование учебных классов физики, химии, математики, информационных технологий.

Другим важным направлением является социальное партнерство с профильными образовательными организациями. У АО «ЕВРАЗ НТМК» существуют долгие партнерские отношения с большим количеством учебных заведений: заключены договоры о сотрудничестве с МИСиС, УрФУ, Нижнетагильским горно-металлургическим колледжем, НТИ НИЯУ МИФИ, Магнитогорским государственным техническим университетом. В рамках сотрудничества осуществляется организация практики, ежегодно 500 студентов выходят на практику на АО «ЕВРАЗ НТМК», работниками и экспертами ЕВРАЗа осуществляется разработка профильных программ подготовки специалистов, а также с прошлого года осуществляется обучение в рамках практики студентов на технических спецкурсах на базе учебного центра: учащиеся изучают контроллеры, электроприводы *Sinamics*, частотно-регулируемые приводы *MICROMASTER*. С 2012 года АО «ЕВРАЗ НТМК» выплачивает корпоративную стипендию лучшим студентам по итогам предыдущего учебного года. В 2017 году 43 студента получили стипендию ЕВРАЗа, за последние 5 лет 40 студентов НТИ (филиала) УрФУ приняли участие в этой стипендиальной программе.

Кроме этого, для преподавателей ЕВРАЗОм разработаны и реализуются программы повышения квалификации и различных стажировок, а для молодых специалистов, трудоустроившихся на АО «ЕВРАЗ НТМК», разработаны программы социальной поддержки: выплата подъемных, компенсация жилья, адаптационная надбавка при трудоустройстве.

Для базовых образовательных организаций АО «ЕВРАЗ НТМК» предусмотрены гранты на развитие материально-технической базы в соответствии с требованиями тех технологий, которые существуют на производстве. В частности, 27 млн. рублей за последние несколько лет мы потратили на развитие Нижнетагильского технологического института и горно-металлургического колледжа. Были созданы такие лаборатории, как «Лаборатория моделирования процессов при обработке металлов давлением», «Лаборатория автоматизации и программных систем», произведена модернизация лаборатории общей физики в НТИ (филиале) УрФУ. Больше восьми лабораторий было создано на базе НТМК: гидравлики, теплотехники, электродинамики, сварочные мастерские, подготовки слесарей КИП, робототехники и мехатроники. Сейчас в НТИ (филиале) УрФУ реализуется проект по созданию студенческого конструкторского бюро.

С целью компенсации дефицита выпускников АО «ЕВРАЗ НТМК» реализует программу профессиональной переподготовки своих работников в учебных заведениях среднего профессионального и высшего образования. Ежегодно более 200 человек от предприятия учатся в учебных заведениях города и России. Специалисты предприятия проходят подготовку кадров высшей квалификации, учатся в аспирантуре с последующей защитой научных работ в области приоритетных для предприятия направлений.

Так, например, сейчас разрабатывается методика расчета калибровки валков для нового шаропрокатного стана, и одним из проектов, который получил высокие оценки на ИННОПРОМе 2017 года, стал совместный проект специалистов УрФУ, Машинопром и АО «ЕВРАЗ НТМК» по повышению стойкости плит кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок. Данная работа выдвинута на соискание премии Правительства Российской Федерации 2018 в области науки техники. Уникальность технических решений, разработанных УрФУ совместно с производителями, закреплена патентами РФ.

В решении задач качества трудовых ресурсов важную роль играют инвестиции в работников. Основной задачей является создание коллектива максимально вовлеченных заинтересованных сотрудников, способных решать самые сложные задачи и обеспечивать качественную работу: создаются комфортные и безопасные условия труда, работники обеспечиваются современной спецодеждой и средствами индивидуальной защиты, все застрахованы от несчастных случаев на производстве и профзаболеваний, обеспечены горячим питанием и компенсацией части расходов на него. Создаются комфортные бытовые условия: для этого в соответствии с утвержденным компанией стандартом проходят ремонты и оснащение современным оборудованием помещений непромышленного назначения: столовые, душевые. Коллективный договор предприятия обеспечивает работникам один из самых привлекательных в регионе социальных пакетов, реализуются соцпрограммы для различных категорий работников, для работающих женщин, молодежи, ветеранов, детей металлургов. Бюджет 2017 года по данной программе составил около 1 млрд. рублей.

Сегодня на АО «ЕВРАЗ НТМК» еще существуют рабочие места с использованием низкоквалифицированного ручного труда, с низким уровнем зарплат относительно основного производства, но они активно уходят в процессе проводимых реконструкций и внедрения новых технологий и оборудования.

В феврале на комбинате будет запущен новый шаропрокатный стан, будет осуществлен пуск новой доменной печи № 7. Поэтому для работы на новом высокотехнологичном оборудовании нужны высококвалифицированные специалисты с высшим образованием.

В заключение несколько слов о перспективах развития. Хотелось продолжить и развивать социальное партнерство между промышленными предприятиями и учебными заведениями, о котором в начале месяца говорил ректор на встрече с производителями, реализовывать программы финансирования подготовки именно технических специалистов в партнерстве с государством, пересмотреть политику развития учебных заведений в городах присутствия крупных промышленных предприятий. Нам нужны программы развития с полным циклом обучения, одного бакалавриата для Нижнего Тагила категорически мало. И хотелось бы решить вопрос открытия новых специальностей для полного охвата перечня по-

требностей промышленных предприятий и продолжить такие проекты, как проработка образовательных траекторий под требования современного производства, проект «Школа – Вуз – Производство», ориентированный на школы города, на поступление выпускников школ на технические направления подготовки и специальности и на то, чтобы наши дети, города Нижний Тагил, учились и дальше работали в нашем городе.

Формирование целевого капитала им. Е. Г. Зудова как инструмент развития НТИ (филиала) УрФУ

Рыбакова Е. Е.

Создатель целевого капитала им. Е. Г. Зудова

Целевой капитал создан на бессрочный период времени и призван формировать вокруг себя сообщество, в состав которого входят благодарные выпускники, значимые лица университета, компании и крупные меценаты, которые заинтересованы в развитии образования по всей стране.

Механизм работы целевого капитала довольно прост, средства, полученные от меценатов, формируют и увеличивают размер капитала. Капитал направляется в банк для получения дохода, и полученный доход распределяется на нужды университета. Управляет целевым капиталом Совет по использованию целевого капитала, в который входят на текущий момент директор НТИ (филиала) УрФУ и создатель целевого капитала. Состав совета может изменяться и пополняться и со временем новыми меценатами и значимыми лицами в области образования и не только. Тело целевого капитала не распределяется и остается всегда под управлением, что дает уверенность в получении ежегодного стабильного дохода для НТИ независимо от того, будут ли в дальнейшем меценаты вкладываться в него или нет. Это один из способов формирования независимой финансовой поддержки для НТИ.

Вся административная работа по целевому капиталу выполняется на платформе *LegacyEndowmentFoundation*, что дает неоспоримое преимущество перед другими целевыми капиталами. НТИ не нужно держать штат сотрудников для ведения документооборота по деятельности целевого капитала – вся рутинная работа выполняется данной платформой.

В эндаументе видится механизм сохранения наследия, которое создается нашими предками, и которое будет поддерживаться новыми поколениями. Хотелось бы, чтобы меня поддержали в моем начинании выпускники университета и люди, которые хотят развивать и поддерживать образование в регионе.

Состояние и перспективы развития металлургии железа и стали

Тлеугабулов С. М., д-р техн. наук, проф.
КазНТУ им. Сатпаева К. И., г. Алматы, Казахстан

В работе дана характеристика традиционной технологии металлургии железа и стали, как двухстадийной, состоящей из восстановительной переработки железорудного сырья в доменной печи и окислительной плавки чугуна в сталь в кислородном конвертере.

Отмечая развитие и успехи двух стадийной технологии железа и стали, вскрыты ее негативные стороны, связанные с высокими выбросами газов и дисперсных отходов. Это ухудшает экологическую обстановку регионов и нарушает экобаланс в мировом масштабе.

Исходя из принципов рационального использования природных ресурсов – металлооксидного сырья и углеродсодержащего реагента – в металлургии железа и стали предложено перейти от существующей схемы подготовки и переработки оксидного окускованного сырья с использованием кокса и горячих восстановительных газов к схеме подготовки и переработки рудоугольного окускованного сырья, позволяющей реализовывать непрерывный восстановительно-плавильный процесс с возможностью выпуска качественной стали.

Представлены технологические схемы традиционных и альтернативных процессов. Отмечены преимущество и революционный характер новой технологии, в которой использование кокса полностью исключается и вместе с этим исключается целый производственный комплекс – коксохимическое производство, а два крупных комплекса – доменный и кислородно-конвертерный – заменены непрерывно и последовательно работающими шахтной печью для металлизации и восстановительно-плавильным агрегатом.

Ключевые слова: железо, сталь, руда, углерод, металл, восстановление, плавка.

Состояние металлургии железа и стали, как фундамента индустрии и приоритетной отрасли экономики любой страны, на сегодняшний день базируется на двух стадийной технологии переработки железорудного сырья в чугун и чугуна в сталь [1]. Доминирует в данной двух стадийной схеме комплекс «доменная печь – кислородный конвертер», на долю которого приходится свыше 70% мирового производства стали [2].

Двух стадийная технология сформировалась исторически в результате соперничества развитых государств за доминирование на мировой арене. Максимальная производительность обеспечивалась практикой восстановительной переработки подготовленного железорудного сырья в доменной печи с выплавкой чугуна и окислительной переплавки чугуна в кислородных конвертерах в сталь. Такая практическая реальность в начале XX века подкреплена теоретическими положениями, исходящими из так называемого адсорбционно-автокаталитического механизма (ААКМ) [3, 4], по которому в качестве восстановительного реагента предпочтение отдавалось горячему восстановительному газу (ГВГ), как свободно обтекающей поверхности кусков в слое железорудных материалов, а использование твердофазного углерода отвергалось, исходя из представления ограниченности его взаимодействия с оксидами металлов только по контактно-диффузионным механизмом (КДМ). Использование потока ГВГ в свою

очередь предъявляет определенные технические требования к подготовке шихты, т.е. необходимость ее окускования для того, чтобы обеспечивалась газопроницаемость слоя в шахтной и доменной печах.

На базе таких теоретических «предположений» практически сложились двух стадийный металлургический комплекс и техническая политика, направленная на его дальнейшее развитие. К существующей технологии каждого крупномасштабного производства продукции проявляется деловое и творческое отношение специалистов и ученых с двух противоположных позиций:

а) стереотипное отношение – «существующее – это закон, так держать и дальше»;

б) критическое отношение – «существующее – это не вечно, имеет недостатки и может быть заменено коренным изменением принципа организации процесса».

Сегодняшние масштабы производства металлов по двух стадийной технологии оказывают положительное влияние на развитие индустрии и экономики стран, а значит и всемирной цивилизации, но имеют обратные негативные эффекты для человеческого общества.

Во-первых, огромный расход ГВГ на единицу перерабатываемого окускованного железорудного сырья находится в пределах 1550–1700 м³/т. Только одна доменная печь средней мощности 2500 т/сут. чугуна, перерабатывает в среднем 4600 т сырья в сутки и выпускает около 7 млн. м³ газа, который после очистки сжигается и, в конечном счете, выбрасывается в атмосферу.

Во-вторых, в зависимости от исходного состава сырья при восстановительной плавке его в доменной печи, наряду с железом достаточно полно восстанавливаются ценные легирующие металлы (марганец, хром, ванадий) и переходят в состав чугуна. Практически всегда при переработке комплексного железорудного сырья выпускается природно-легированный чугун. Однако окислительная плавка его в кислородном конвертере приводит к полному окислению полезных примесей и переходу их в состав конвертерного шлака, который на большинстве металлургических комбинатов выбрасывается в отвалы [5, 6]. Получаемая сталь загрязнена оксидными включениями и является «сырой» (полупродуктом), т.е. нуждается далее в целом ряде выпечных обработок, связанных с довольно большими финансовыми и материальными затратами.

Из анализа перечисленных факторов, как видно, выявляется проблема не только в качественных показателях устоявшейся традиционной технологии, но и в нарушении экологической безопасности, что сегодня беспокоит мировое сообщество. На долю двухстадийной технологии приходится около 1,3 млрд т мирового производства стали. А на 1 т стали с учетом всего комплекса от подготовки сырья, топлива до выпуска продукта приходится 4000 м³ газа и суммарные выбросы газов в атмосферу в мировом масштабе составляют 5,2 триллиона м³ газа. Это вызывает серьезны-

воздействия и необратимые последствия на окружающую среду, что представляет угрозу для мировой экологической обстановки. Остановить или существенно сократить такое огромное производство невозможно. Проблема может быть решена разработкой и реализацией новой революционной технологии металлургии железа и стали.

Сегодня настало время повернуть техническую политику в направлении поиска и организации революционных технологий, обеспечивающих высокую экономическую эффективность и экологическую безопасность. В металлургии железа и стали сегодня есть такая технология. Она основана на новых теоретических положениях [7–9] процессов прямого восстановления металлов. Природа дала человечеству огромную массу металлооксидного сырья в земной коре и соответствующую массу альтернативного вещества – диоксида углерода в атмосфере поверхности Земли. Долг всего человечества заключается в рациональном использовании этих ресурсов для поддержания и развития жизнедеятельности на поверхности нашей планеты. В атмосфере Земли содержится углерод в виде диоксида (CO_2) массой в пересчете на углерод более 60 триллионов тонн. Именно он подпитывает растительный, животный мир и жизнедеятельность человечества, причем его масса возобновляется в результате массообмена между атмосферой и поверхностью Земли. Перед человечеством стоит проблема регулирования этого массообмена для того, чтобы поддерживать баланс равновесия – сколько углерода отдано атмосферой Земле, столько же должно быть возвращено обратно в атмосферу и никак не более.

Одним из основных источников выброса газа в виде CO_2 является металлургия. Поэтому принципы организации восстановительных процессов на базе металлооксидных и углеродсодержащих ресурсов определяет количество выбросов газа в атмосферу. Следует отметить, что за последние 20 лет объемы производства чугуна и стали возросли вдвое. Соответственно увеличились выбросы и усилилось техногенное воздействие на окружающую среду, которое уже сейчас отражается на изменении климата. Это вызывает тревогу и требует ускорения в принятии экстренных мер по реорганизации металлургического цикла.

Существующий принцип организации восстановительных процессов между окисленным оксидным сырьем и ГВГ, как было показано в начале данной работы, обречен на колоссальные выбросы газов. Это происходит потому, что сам ГВГ получают в результате неполного окисления углерода с образованием горячего газа CO . При этом углерод теряет более половины своего восстановительного потенциала. Низкий восстановительный потенциал ГВГ приводит к увеличению расхода газа CO на газификацию (восстановление) единицы массы кислорода из оксида железа до $3,5 \text{ м}^3/\text{кг}$. При использовании твердого углерода, как восстановительного реагента, газообразный продукт реакции прямого восстановления железа на единицу газифицируемого кислорода составит только $1,23 \text{ м}^3/\text{кг}$, т.е. в 2,85 кратно ниже.

Отсюда следует констатировать, что предполагаемый механизм ААКМс самого начала вытекал не из анализа основ фундаментальных наук, а из практических представлений видимой части природных явлений. Анализируя процессы массообмена в целом на основе фундаментальных наук и глубинных «невидимых» природных явлений еще в 1991 г был сформулирован, альтернативный «диссоциационно-адсорбционный механизм» (ДАМ) [10]. Диссоциация химических соединений веществ – это феномен природных явлений, предшествующий процессу массообмена. При диссоциации оксида металла передача кислорода к восстановительному реагенту реализуется через стадии его хемосорбции и адсорбции на реакционной поверхности матрицы. Поэтому явление адсорбции характерно не только внешнему газовому потоку, но и газообразным продуктам диссоциации оксидов, что и учтено в новом механизме (ДАМ). Восстановительный процесс начинается не сразу с переноса атомов и молекул реагентов, а с переноса «невидимых» частиц – электронов. Поэтому на скорость и эффективность массопереноса большее влияние оказывает, прежде всего, электронный потенциал восстановительного реагента. В этом отношении твердый углерод имеет большое преимущество перед ГВГ. Если оксид углерода СО в ГВГ имеет всего два валентных электрона, то твердый углерод имеет 4 валентных электрона, а также большое число свободных межплоскостных электронов. Поэтому твердый углерод не ограничен «контактно-диффузионным механизмом», как представляется в ААКМ, а имеет большой диапазон потока электронов как в контактных, так и разобращенных поверхностных слоях. Только для реализации эффективности его использования необходимо создать исходные условия подготовки шихты, состоящей из дисперсной рудугольной смеси. Для организации реальных металлургических процессов из такой смеси могут быть получены рудугольные окатыши или брикеты. Последовательная организация процессов сушки, металлизации и восстановительной плавки обеспечивает полноту использования твердого углерода и восстановления не только железа, но и ценных примесных металлов и выплавку не сырой стали, как по существующей технологии, а качественной природно-легированной стали.

Сравнительная оценка существующей двустадийной и предлагаемой перспективной технологии характеризуется соответствующими технологическими схемами (рис. 1 и 2).

Сравнительная оценка представленных технологических схем показывает, что традиционная технология основана на подготовке и переработке оксидного окускованного сырья в определенных массовых соотношениях с коксом, альтернативная технология на подготовке и переработке дисперсной рудугольной смеси или рудугольных окатышей.



Рис. 1. Схема современной двухстадийной технологии производства стали



Рис. 2. Схема перспективной одностадийной непрерывной технологии производства стали

Как видно, в альтернативном варианте использование кокса полностью исключается и вместе с этим исключается целый производственный комплекс – коксохимическое производство. Далее два крупных комплекса доменный и кислородно-конвертерный заменены непрерывно и последовательно работающими шахтной печью для металлизации и восстановительно-плавильным агрегатом, капиталоемкость которыхкратно ниже капиталоемкости первых.

Самое главное – по первой схеме получаем конечный продукт в виде сырой, загрязненной оксидами сталь, а по второй схеме – готовую природно-легированную сталь высокого качества.

Библиографический список

1. Курунов, И. Ф. Состояние и перспективы бездоменной металлургии железа / И.Ф. Курунов, Н.А.Савчук. – М. :Черметинформация, 2002. – 198 с.
2. Курунов, И. Ф.Состояние и тенденции развития металлургии железа в мире в свете вызовов XXI века // Металлургия чугуна – вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. – С. 10–20.
3. Чуфаров, Г. И.Адсорбционно-каталитическая теория восстановления окислов металлов / Г.И. Чуфаров,Е.П.Татиевская // Проблемы металлургии. – М. : АН СССР, 1956. – С. 21–32.
4. Гельд, П.В.Роль газовой фазы при восстановлении окислов твёрдым углеродом // Химия и технология редких элементов. Труды института химии УФАН СССР. Свердловск, 1957. –Вып.8. – С. 8-14.
5. Вторичные материальные ресурсы черной металлургии: Справочник в 2-х т. / под ред. Л.А. Смирнова. – М. : Экономика, 1986.
6. Леонтьев, Л.И.Пирометаллургическая переработка комплексных руд /Л.И.Леонтьев,Н.А.Ватолин, С.В.Шаврин, Н.С.Шумаков. – М.:Металлургия, 1997.– 432 с.
7. Тлеугабулов, С.М.Восстановительная плавка комплексного железорудного сырья / С.М. Тлеугабулов,С.Б. Абигов, Д.Х. Алтыбаева, Б.С. Тлеугабулов, Ю. Д. Исупов //Сталь. – 2015. – № 5. – С. 20–24.
8. Тлеугабулов, С. М. Восстановительная плавкамоношихты / С.М. Тлеугабулов, Б.С. Тлеугабулов, Г.М.Койшина,Д.Х. Алтыбаева, Е.Б.Тажиев//Металлург. – 2016. – № 1. – С. 35–40.
9. Тлеугабулов, С. М.Проблемы организации непрерывной восстановительной плавки стали // С.М. Тлеугабулов, Б.С. Тлеугабулов, С.Б. Абигов // Сталь. – 2016. – № 9. – С. 10–15.
10. Тлеугабулов, С. М.Диссоциационно-адсорбционный механизм и кинетика твердофазного восстановления железа углеродом / С.М. Тлеугабулов // Сталь. – 1991. – №1. – С. 15–18.

Образовательный кластер как эффективная система подготовки кадров

Соколов Б. Я.

Президент союза «Торгово-промышленная палата г. Нижний Тагил»

Основная задача системы профессионального образования независимо от ступени – подготовка специалистов с высоким уровнем компетенций. Специалисты, подготавливаемые учебными заведениями, должны быть конкурентоспособными на рынке труда. Это возможно лишь когда существует баланс целей и задач, стоящих перед системой образования и запросом отраслей экономики.

К сожалению, подготовка специалистов в образовательных организациях существует сама по себе, а предприятия – сами по себе. В итоге предприятия вынуждены создавать собственные образовательные центры, тем самым повышая непроизводительные затраты и снижая конкурентоспособность своей товарной продукции за счет повышения ее себестоимости. Эта вынужденная мера говорит о несбалансированности рынка труда по причине крайней недостаточности горизонтальных связей между образовательными учреждениями и работодателями.

Выход из сложившейся ситуации – создание образовательного кластера, как эффективной системы подготовки кадров. Образовательный кластер – это географическая концентрация учреждений профессионального образования и предприятий, объединенных как по отраслевому признаку, так и по межотраслевому (т. к. имеется большое количество сквозных профессий) в единую организационную структуру, элементы которой взаимосвязаны и функционируют для обеспечения развития потенциала и повышения конкурентоспособности обучающихся на рынке труда.

В основании образовательного кластера находится единый учебный, научный и инновационный процесс, организационное, учебно-методическое, научное и информационное взаимодействие между всеми субъектами кластера. То есть форма связи внутри кластера позволяет субъектам сохранять статус юридического лица и сотрудничать с другими субъектами за пределами кластера. Таким образом, кластер характеризуется:

- преобладанием организационных связей между его элементами;
- необязательным наличием отношений экономической зависимости между юридическими лицами;
- обеспечением производственно-коммерческой деятельности на основе эффективного стратегического альянса и делового сотрудничества.

Образовательный кластер создается с целью упорядочения и координации деятельности по подготовке и повышению квалификации кадров, поиска оптимальных путей управления системой профессионального образования. Конечная цель создания кластера – органическое слияние всех заинтере-

сованных учреждений в единый комплекс непрерывного профессионального образования.

Важно отметить, что к образовательным учреждениям относятся не только СПО, вузы, но и учреждения дополнительного образования. Система должна быть непрерывной, включать в себя как подготовку, так и переподготовку кадров при обязательной общественно-профессиональной аккредитации образовательных программ, проводимой объединениями работодателей.

Учитывая де-факто сформировавшуюся систему городских агломераций, мы считаем, что именно в них необходимо формировать образовательные кластеры. В Свердловской области это сделать проще, т. к. существует система управленческих округов, в рамках которых, на наш взгляд, внедряется кластерная система подготовки специалистов. Существует лишь одна проблема: отсутствие законодательной базы.

Требования работодателей к уровню компетенции работников находятся в постоянной динамике, это обусловлено внедрением новых технологий, удовлетворение этих запросов может быть обеспечено через кластер.

Роль органов власти (самостоятельно или через агентов):

- проведение мониторинга рынка труда;
- разработка территориальных программ развития производительных сил;
- определение соответствующих компетенций по их виду и количеству.

Все вышеперечисленное может быть реализовано только при участии объединений работодателей.

Преимуществами образовательного кластера в системе управления профессиональным образованием являются следующее:

1. Формирование инструмента взаимодействия образовательных учреждений с рынком труда, появление основания для диверсификации социально-экономического развития территории.

2. Улучшение кадровой инфраструктуры, т. к. нельзя допустить, чтобы нарушение естественных механизмов воспроизводства привело к серьезным проблемам отсутствия необходимых кадров в реальном секторе экономики.

3. Создание условий для реализации непрерывного профессионального образования.

4. Обеспечение работы механизма социального лифта – вертикальной социальной мобильности, карьерного роста. Как отметил Президент РФ Владимир Путин в ходе недавнего телемоста с ведущими высшими учебными заведениями страны: «Благодаря образовательной мобильности внутри страны у молодых людей, возможно, не будет необходимости уезжать на учебу за границу».

Таким образом, одним из признаков кластера является наличие прямых продолжительных связей между всеми участниками совместной деятельности. Создание такого рода связей как раз и требует компактного географического расположения предприятий с целью снижения издержек. Сетизация выражается в отказе от вертикальной иерархии бюрократической организации и в этой связи в переходе к горизонтальным взаимосвязям.

В рамках кластера необходима реализация преемственности всех звеньев данной системы. Речь идет о взаимодополняющих связях. Каждое предыдущее звено должно быть полноценным этапом для последующего. Это достигается введением сквозных учебных планов и адаптированных программ, в результате чего исключается дублирование учебного материала.

Итак, в образовательном кластере должна доминировать горизонтальная линия:

- вуз должен проводить большую работу вместе с объединениями работодателей;

- Союз «Торгово-промышленная палата город Нижний Тагил» должен взять на себя организацию при социальном заказе органов власти через механизм мониторинга рынка труда;

- представители работодателей должны определять качество подготовки специалистов СПО и вуза через их аттестацию, в основе которой должны лежать профессиональные стандарты.

На наш взгляд, Союз «Торгово-промышленная палата город Нижний Тагил» может стать реальным центром, имеющим доступ как к научно-теоретическому потенциалу, так и к высококвалифицированным кадрам. ТПП НТ имеет возможность осуществлять диагностику образовательных потребностей на территории, выстраивать многофункциональные связи с различными учебными заведениями, органами образования и работодателями. По нашему мнению, Торгово-промышленная палата может занимать центральное место, объединяя вокруг себя образовательную ситуацию и учреждения системы образования, кадровую ситуацию и представителей потенциальных работодателей. В результате ожидаем, что должно произойти усиление педагогической практики, совместной разработки с педагогическими коллективами базовых учебно-образовательных учреждений актуальных исследований по теории и практике педагогического образования и внедрения результатов, а также интеграция образовательных учреждений и работодателей.

Организация образовательного кластера обеспечивает решение важнейшей задачи профессиональной подготовки – переход от массово-репродуктивного производства специалистов к их индивидуально-творческой подготовке, к формированию творческой конкурентоспособной личности.

ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Необходимость установки дополнительного агрегата «печь-ковш» на АО «НПК «Уралвагонзавод»

Бахарев М. А.

АО «НПК «Уралвагонзавод», г. Нижний Тагил

Пыхтеева К. Б., канд. техн. наук, доц.

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Данная работа является анализом потерь от брака при производстве клина из высокопрочного чугуна. Целью является показать оптимальность введения на производство новых агрегатов. В статье подробно описана возможность исключения потерь от брака путем установки агрегата «печь-ковш», оптимизации затрат на производство, и вследствие недопущения удорожания продукции. Описаны все плюсы модернизации производства при реконструкции существующих цехов. На основании приведенных в статье данных доведены достоинства введения этого агрегата в производство. Выводы сделаны основываясь на анализе работы отечественных флагманов металлургии. Актуальность данной статьи в том, что использование установок «печь-ковш» позволяет в кратчайшие сроки и с быстро окупаемыми затратами улучшить качество стали, расширить марочный сортамент. Так же дает возможность сократить расход легирующих и добавочных материалов, снизить потребление энергоносителей на получение стали, уменьшить угар, а также повысить производительность основных сталеплавильных агрегатов за счет переноса части технологических операций по доводке стали до требуемых параметров непосредственно на установке «печь-ковш».

Ключевые слова: высокопрочный чугун ВЧ-120; потери от брака; удорожание производственного процесса; технология внепечной обработки стали; доводка стали по химическому составу и температуре; дуговой нагрев расплава; введение агрегата «установка «печь-ковш»; увеличению масштабов производства стали и сплавов; аргонный стенд; устройство для вдувания порошка углеродсодержащих материалов в металл; система бункеров; трайб-аппарат; устройством для измерения температуры и взятия пробы (термопроб).

Проанализировав работу по производству «мелкого стального литья» цеха 552 на предприятии АО «НПК «Уралвагонзавод» в части потери от брака при производстве клина из высокопрочного чугуна ВЧ-120, мною были сделаны выводы об основных аспектах причин данных потерь.

Первой причиной является нестабильный химический состав во всем объеме ковша, вторая – это большое расстояние от дуговой сталеплавильной печи до разливки металла в формы (расстояние составляет около 400 м), вследствие чего происходят большие потери тепла при транспортировке и переливе металла с использованием двух ковшей.

С печи чугун выпускают в раздаточный ковш емкостью 5т, а из раздаточного переливают в разливочные ковши емкостью 1т, что приводит к потерям тепла и к концу разливки плавки температура снижается до минимальной – 1380 °С, что в свою очередь приводит к неполному растворению модификатора в полном объеме детали. Это в свою очередь приводит к неметаллическим включениям в отливке.

Обе эти проблемы в одинаковой степени приводят к потерям от брака и удорожанию производственного процесса, поэтому был рассмотрен вариант решения для избежания данного фактора – необходимость внепечной обработки металла.

В технологии внепечной обработки стали и конструкции оборудования для заводов со стратегией производства специализированной продукции наряду с оптимальным соотношением таких параметров как производительность, энергоемкость процесса, капитальные и эксплуатационные затраты, особую актуальность приобретает возможность гарантированного обеспечения высоких требований к качеству металлопродукции. После выпуска металла из плавильного агрегата все дальнейшие шаги по доводке стали как по химическому составу, так и температуре выполняются исключительно в ковше. Такая схема, как показывает практика, делает процесс выплавки и разливки стали более экономичным, а также обеспечивает наиболее полное совмещение процесса выплавки и разливки стали.

Общепризнанным путем реализации вышеперечисленных операций является комплексная обработка расплава в сталеразливочном ковше с применением мощного высокотемпературного источника локального нагрева, который обеспечивает непрерывную компенсацию тепловых потерь. При этом тепловая энергия концентрируется в зоне шлака для поддержания необходимых, рафинирующих свойств и плавления высокотемпературных компонентов шлаковой смеси. С другой стороны, сочетание высокотемпературного локального нагрева с принудительным перемешиванием расплава приводит к усреднению температуры во всем объеме. Принудительное циркуляционное перемешивание расплава в ковше является обязательной технологической операцией, обеспечивающей высокую эффективность внепечной обработки в целом. В сочетании с перемешиванием становится возможной реализация эффективного дугового нагрева расплава, существенно возрастает скорость его усреднения, рафинирования различными технологическими средствами.

В металлургической практике установки, обеспечивающие нагрев и перемешивание стали в ковше, ее рафинирование и корректировку химического состава, получили название установки «печь-ковш».

Установка комплекса «печь-ковш» позволит перед заливкой чугуна в формы стабилизировать химический состав путем продувки инертными газами и стабилизировать температуру заливки на всем протяжении процесса заливки металла в формы. Для ускорения физико-химических процессов, происходящих в ходе внепечной обработки, на практике наиболее широко используется продувка жидкой ванны аргоном. Практика последних десятилетий показывает, что вопрос рационального перемешивания металла в ковше при продувке аргоном является особенно актуальным при работе установок «печь-ковш». Так же можно вести разливку чугуна в формы непосредственно с печи-ковша стационарно, что позволит убрать

лишнее звено разливочного процесса, которое влияет на значительное снижение температуры (разливочный ковш емкостью 1т).

В целом, в ходе обработки стали в ковше могут выполняться следующие операции: гомогенизация металла по температуре и химическому составу, корректировка химического состава стали путем присадки соответствующих лигатур, удаление вредных примесей (сера, водород, азот, а иногда углерод и пр.), доведение температуры металла до регламентируемого технологией значения, рафинирование стали по неметаллическим включениям, получение стали с постоянными свойствами от плавки к плавке, управление составом шлака и т. д.

Нагрев металла на агрегате «печь-ковш» осуществляется так же, как в дуговых печах, но мощность трансформаторов установок «печь-ковш» значительно меньше, чем используется на дуговых печах и составляет 100–160 кВА/т. Это объясняется отсутствием такой энергозатратной стадии, как расплавление лома и тепло затрачивается только на расплавление вводимых материалов и поддержание температуры металла.

Современный агрегат «печь-ковш» имеет вполне устоявшуюся технологическую архитектуру и конструкцию основных функциональных элементов, в состав которых входит аргонный стенд, который состоит из рамы, на которой смонтированы клапаны, редуктор и измерительные приборы, соединенные трубной разводкой. К стенду подводится аргонопровод с давлением газа 1,2–1,6 МПа. От стенда аргон подается к нижней продувочной фурме, установленной в днище ковша, имеется подвод к верхней (аварийной) фурме. Устройство для верхней продувки стали аргоном в ковше при запечатывании донной фурмы состоит из стойки, установленной на рабочей площадке вблизи агрегата «печь-ковш», и каретки с приводом, перемещающейся вертикально.

Для выравнивания химического состава и повышения содержания углерода в расплаве применимо устройство для вдувания порошка углеродсодержащих материалов в металл, а в некоторых случаях можно использовать для вдувания порошкообразной извести. Установка имеет систему автоматического и ручного управления. В качестве транспортирующего энергоносителя применяют инертный газ или осушенный сжатый воздух.

Для подачи шлакообразующих и легирующих материалов в агрегат «печь-ковш» используется система бункеров в количестве от 6 до 12. В зависимости от сортамента выплавляемой стали и технологии ее производства на конкретном предприятии объем бункеров может колебаться от 2 до 10 м. Бункеры оснащают датчиками нижнего уровня материалов. Наличие системы бункеров и весодозирования оперативно решает вопросы по корректировке химического состава и соблюдению технологического процесса внепечной обработки стали. Управление системой осуществляется через автоматизированную систему управления технологическими процессами,

что позволяет свести до минимума брак и сократить продолжительность обработки стали в агрегате «печь-ковш».

Следующим технологическим устройством агрегата «печь-ковш» является трайб-аппарат. Для подачи проволоки в ковш используют одно-, двух- и четырехручьевые трайб-аппараты. С целью уменьшения габаритов устройства бунты и трайб-аппарат располагают на разных уровнях. Трайб-аппарат оснащен локальной автоматической системой управления, включая счетчики-индикаторы.

Для осуществления контроля за температурным режимом и химическим составом расплава агрегат «печь-ковш» он оснащен устройством для измерения температуры и взятия пробы (термопроб). Устройство для измерения температуры и взятия проб располагают на рабочей площадке вблизи агрегата «печь-ковш». Устройство управляется с местного пульта или из поста управления.

После достижения заданных значений по химическому составу и температуре, ковш с металлом передают на разливку.

Результаты внепечной обработки определяются принятыми методами и технологией, с помощью которых они осуществляются. Новые технологии обработки металла как в сталеплавильных печах, так и, главным образом, вне их, повсеместно привели к заметному увеличению масштабов производства стали и сплавов, однородных по свойствам и содержащих ничтожно малое количество газов, неметаллических включений.

Связанное с этим усложнение технологии оправдывается достигаемыми результатами в отношении качества и надежности металлопродукции, а эффективность использования установка «печь-ковш» подтверждается практикой работы отечественных флагманов металлургии.

Изучив и проанализировав опыт аналогичных предприятий металлургической сферы, где многократно и многочисленно была произведена установка комплекса «печь-ковш», можно сделать вывод о целесообразности и необходимости установки агрегата, так как на схожих предприятиях она дала положительные результаты в внепечной обработке металла.

Сегодня использование установок «печь-ковш» для комплексной внепечной обработки стало обязательным для новых цехов и при реконструкции существующих. Использование установок «печь-ковш» позволяет улучшить качество стали, расширить марочный сортамент, сократить расход легирующих и добавочных материалов, снизить потребление энергоносителей на получение стали, уменьшить угар, а также повысить производительность основных сталеплавильных агрегатов за счет переноса части технологических операций по доводке стали до требуемых параметров непосредственно на установке «печь-ковш».

Библиографический список

1. Брук Л.Ц., Еремин Б.С. Справочник сталевара дуговой электропечи. – М; Государственное научно техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 174 с.

2. Малиновский, В. С. Способ электроплавки и дуговая печь для его осуществления./ Патент РФ №2104450/ 1998.
3. Аксенов П.Н. Технология литейного производства. – М.: МАШ- ГИЗ, 1957. – 665 с.
4. Кудрин В.А. Внепечная обработка стали и чугуна / В.А. Кудрин. – М. : МИ-СиС, 1992. – 256 с.
5. Вихлевщук В.А. Ковшевая доводка стали / В.А. Вихлевщук, В.С. Харахулах, С.С. Бродский. – Днепропетровск : Системные технологии, 2000. – 190 с.
6. Авдеев В.А. Основы проектирования металлургических заводов / В.А. Авдеев, В.М. Друян, Б.И. Кудрин. – М. : Интернет Инжиниринг, 2002. – 464 с.
7. <http://naukarus.com/induktsionnye-sistemy-i-metody-srednechastotnoy-plavki-chernyh-metallov>.

Упрочнение стали 09Г2С карбидоборидом электроискровым и лазерным способами

Белозеров Л. С., Казин А. А., Плещев В. П.
Купцов С. Г., канд.техн.наук, доц.
Магомедова Р. С., канд.техн.наук, доц.
УрФУ, г. Екатеринбург

Рассмотрено влияние покрытия сплава карбидоборида, нанесенного на поверхность стали 09Г2С, методом гибридного электроискрового-лазерного легирования, на физико-механические свойства стали: шероховатость, толщина, износостойкость и микротвердость. Каждая характеристика образца фиксировалась на всех стадиях: без покрытия, после электроискровой обработки, после лазерной обработки. В процессе работы покрытые образцы испытывали на износостойкость на установке Хаворда-Бринелля на свободном абразиве, затем упрочненные образцы обработали лазерным лучом, лазерная обработка позволит получить более гладкую и ровную поверхность образцов после покрытия, практически не теряя массу, затем вновь выполнили испытания на износ и сравнили результаты. Каждый образец подвергается испытанию 10 раз, после каждого этапа фиксируются результаты с целью отображения убыли массы после трения. На образцы наносили покрытие на разных режимах, для того чтобы определить более подходящий режим. Можно заключить, что покрытые образцы рекомендуется обработать лазерным лучом для снижения шероховатости и улучшения качества упрочняющего слоя. Результаты металлографического исследования показывают, что лазерная обработка позволяет устранить несплошности покрытия. Исследование микротвердости образцов позволяет сделать вывод о том, что электроискровое упрочнение с применением лазерной обработки значительно увеличивает твердость покрытия.

Ключевые слова: электроискровое легирование; покрытие; упрочнение; лазерная обработка; карбидоборид; износостойкость.

Электроэрозионная обработка – обработка металлических поверхностей, заключающаяся в изменении формы, размеров, шероховатости и свойств поверхности электропроводной заготовки под действием электрических разрядов в газовой среде, возникающих между заготовкой и электродом-инструментом. Электроэрозионная обработка осуществляется при искровой форме электрических зарядов длительностью от 10–6 до 10–3с. Один из электродов является обрабатываемой заготовкой, другой –

электрод-инструментом. Разряды производятся периодически, импульсно, так чтобы среда между электродами восстановила свою электрическую прочность [1, с. 14], [2, с. 21].

Под действием лазерного упрочнения происходят фазовые и структурные изменения обрабатываемого поверхностного слоя, что позволяет придать ему высокие прочностные свойства. Лазерное упрочнение влияет на следующие характеристики: глубину и толщину покрытия, концентрацию легирующего элемента, шероховатость поверхности, твердость и структуру легированного слоя [3, с. 12], [4, с. 5]. Совместная электроискровая и лазерная обработка поверхности покрытия значительно увеличивает сопротивление абразивному износу.

Известно, что процесс электроискровой обработки – это эффективный метод для восстановления и упрочнения поверхности металлов, который исследуется достаточно давно. Проводятся исследования новых тугоплавких сплавов, которые раньше не применялись для упрочнения, экспериментально выявляют их прочностные, механические и физические свойства для разных сталей и сплавов [5, с. 70], [6, с. 433].

Главный недостаток электроискрового упрочнения заключается в том, что при увеличении толщины нанесенного покрытия, увеличивается его шероховатость, что негативно отражается на его эксплуатационных свойствах. Для решения данной проблемы, а именно уменьшения шероховатости, предлагается внедрить гибридную электроискровую лазерную обработку, а также изучить ее влияние на качество электроискрового покрытия и на его характеристики, такие как: износостойкость, толщина упрочненного слоя, микротвердость и шероховатость.

Целью данной работы является: изучить свойства покрытия изкарбидоборида, нанесенного на поверхность стали 09Г2С гибридным электроискровым лазерным способом. Последовательно проверяли электроискровое упрочнение стали 09Г2С, затем выполнили лазерную обработку полученного электроискрового покрытия, чтобы определить влияние совместной обработки на физико-механические свойства стали 09Г2С.

В данной работе использовали образцы из стали 09Г2С (химический состав приведен в табл. 1, электродом для электроискровой обработки применялся сплав карбидоборида титана, полученный методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [7, с. 3]. Химические составы исходных шихт, продуктов и фазовый состав электродов для электроискрового легирования приведен в табл. 2. Полученное электроискровое покрытие проверяли на износостойкость, далее оно обрабатывалось лазерным лучом и испытывалось вновь. Свойства полученных покрытий приведены в табл. 4, табл. 5. Обработанные образцы испытывали на износостойкость с помощью установки Хаворда-Бринелля на свободном абразиве (речной песок). Результаты испытаний приведены в табл. 6.

Таблица 1

Химический состав стали 09Г2С

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
0,11	0,65	1,64	0,25	0,035	0,03	0,25	0,006	0,25	0,06

Таблица 2

Фазовый состав электродов для ЭИЛ

Фазовый состав	Содержание основных компонентов, масс.%					
	В шихте			В продуктах		
	B	Ti	C	B	Ti	C
TiB ₂ ; TiC;	27,40	65,0	7,60	26,32	64,88	7,65

Таблица 3

Режимы нанесения ЭИ покрытия

Образец	Режим ЭИО	Емкость, мкФ	Рабочий ток, А
1	RC-1	480	10-15
2	RC-2	480	20-30
3	RC-3	480	60-80
4	ТТ-9	320	3,1

Таблица 4

Данные образцов после нанесения покрытия

Номер образца	1	2	3	4
Режим нанесения покрытия	RC-1	RC-2	RC-3	ТТ-9
Масса после нанесения покрытия, г	18,531	19,281	19,677	19,261
Прибыль массы, г	+0,076	+0,201	+0,377	+0,182
Толщина после нанесения покрытия, мм	2,05	2,208	2,392	1,948
Прибыль толщины, мм	+0,126	+0,234	+0,376	+0,047
Шероховатость после покрытия, мкм	26,222	52,444	95,444	73,333

Таблица 5

Шероховатости поверхностей

Номер образца	1	2	3	4	К
Начальная шероховатость образцов, мкм	22,5	46,45	84,77	69,33	75,18
Шероховатость после ЭИЛ, мкм	26,22	52,39	95,45	73,41	-
Шероховатость после лазерной обработки, мкм	18,8	41,78	76,32	63,51	-

Результаты исследований и их обсуждение

Лучшие результаты на износостойкость показали образцы, на которые наносили покрытие режимом RC-1, в сравнении с образцами, которые были покрыты режимом ТТ-6, первая пара образцов не сильно отличается результатами, что говорит о качестве упрочнения и стабильности режима, в то время как режим ТТ-6 показал неоднозначные результаты. Обработка лазером обеспечивает равномерное распределение нанесенного покрытия на поверхность образца и создает прочное сцепление с основным металлом, это характеризуется увеличением подвижности атомов, за счет чего увеличиваются процессы диффузии. Благодаря такой обработке покрытие лучше взаимодействует с основным металлом и повышает прочностные

свойства. Электроискрового упрочнения, это обуславливается тем, что изначально стирается неровности покрытия и так называемые «кратеры», а после качественной лазерной обработки и взаимодействия покрытия с основным металлом, скорость износа уменьшилась.

Лучшие результаты на износостойкость показали образцы № 3 и № 4, на которые наносили покрытие режимом РС-3 и ТТ-9, первая пара образцов не сильно отличается результатами, что говорит о качестве упрочнения и стабильности режима. Обработка лазером обеспечивает равномерное распределение нанесенного покрытия на поверхность образца и создает прочное сцепление с основным металлом, это характеризуется увеличением подвижности атомов, за счет чего увеличиваются процессы диффузии. Благодаря такой обработке упрочняющий материал лучше взаимодействует с основным металлом и повышает прочностные свойства.

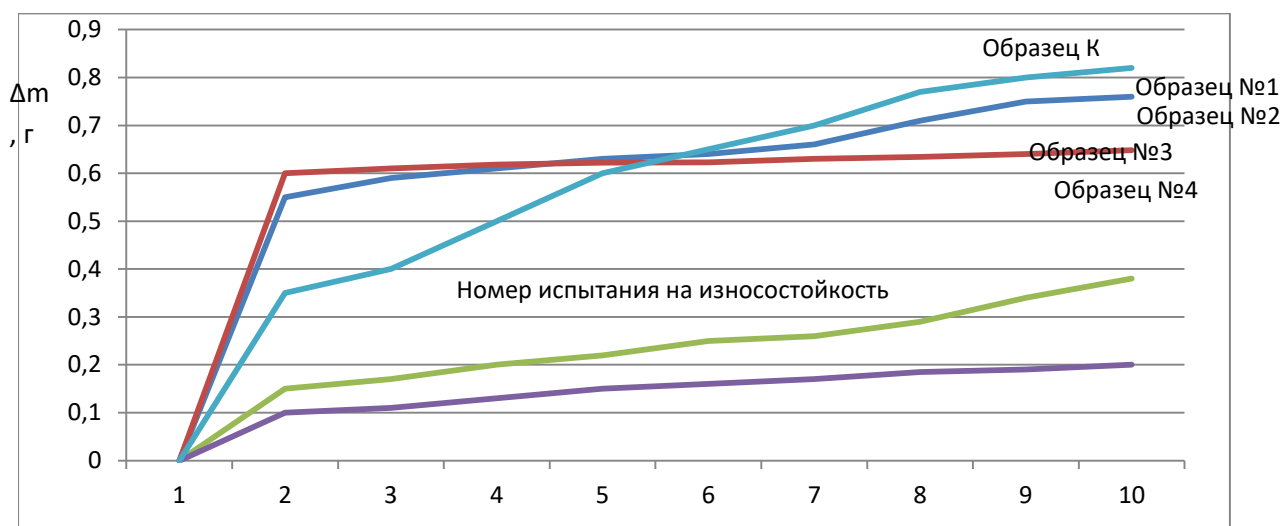
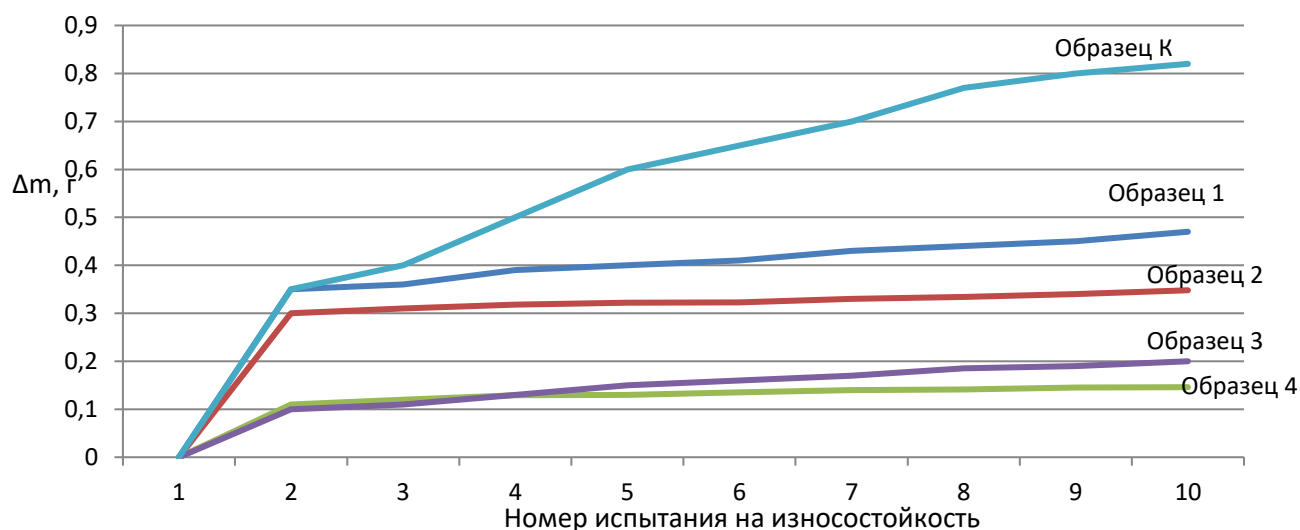


График 2

Изменение массы образцов Δm после лазерной обработки



При лазерной обработке происходит высокая концентрация подводимой энергии, что позволяет выполнять обработку поверхности участка материала без нагрева остального объема и изменения структуры металла. Обработка лазером позволяет получить равномерное распределение нанесенного покрытия и создает прочное сцепление с основным металлом. На гистограмме 1 приведены измерения микротвердости образцов после электроискровой и лазерной обработках. Во всех случаях средние значения микротвердости упрочненного слоя оказались выше, чем у основного металла, это говорит о том, что покрытие увеличивает прочностные свойства стали 09Г2С. Лучший результат показал образец № 1.

Гистограмма 1 – Значения микротвердости после электроискровой и лазерной обработках

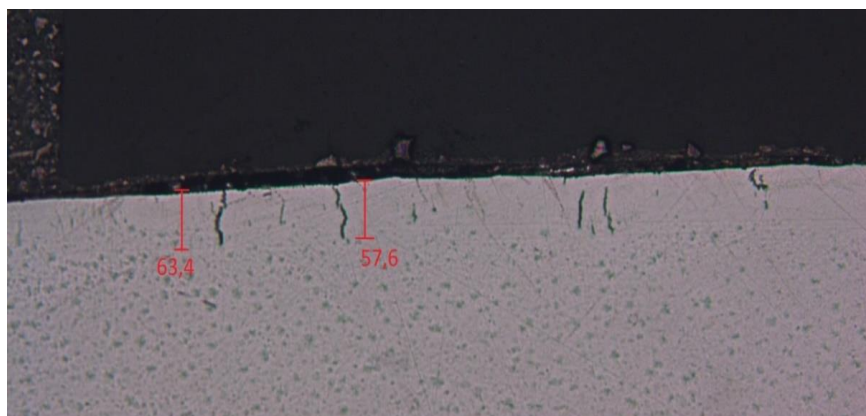
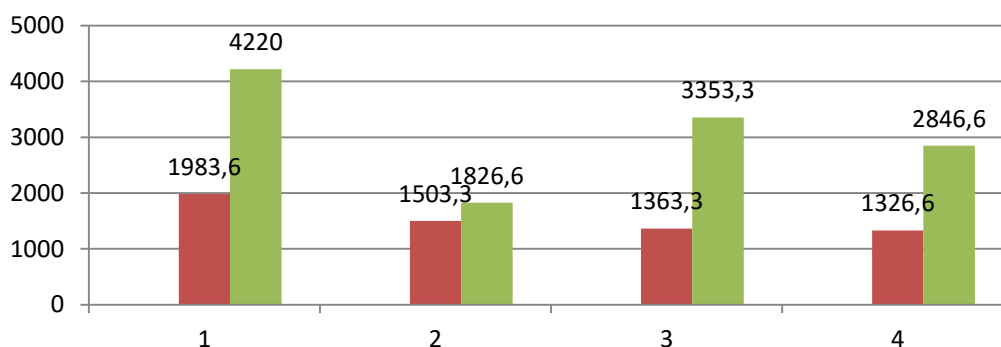


Рисунок 1. Образец № 1 электроискровое покрытие

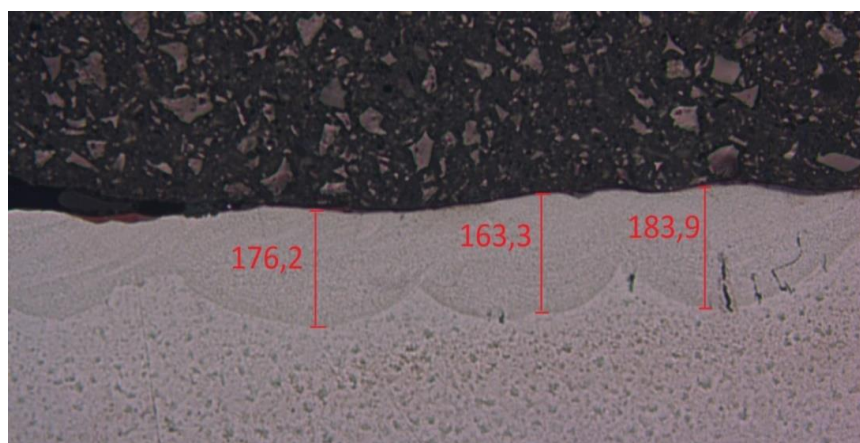


Рисунок 2. Образец №1 лазерная обработка

Вывод

В процессе эксперимента были обработаны образцы из конструкционной стали 09Г2С методом гибридного электроискрового-лазерного упрочнения электродом из тугоплавкого сплава карбидборида, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Показано, что физико-механические свойства стали, а именно: шероховатость, толщина, износостойкость покрытия и микро-твердость значительно увеличиваются. Результаты металлографического исследования показывают, что лазерная обработка повышает качество покрытия.

Библиографический список

1. Лазаренко Б.Р. Лазаренко Н.И. Электроискровой способ обработки металлов. Станки и инструмент / Б.Р. Лазаренко. – Москва :Электронная обработка материалов, 1946. – 14 с.
2. Лазаренко Н.И. О механизме образования покрытие при электроискровом легировании металлических поверхностей / Н.И. Лазаренко. – Москва:Электронная обработка материалов, 1965. – 21 с.
3. Лазаренко Н.И., Лазаренко Б.Р. Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н.И. Лазаренко. – Москва :Электронная обработка материалов, 1977. – 12 с.
4. Лазаренко Н.И. Современный уровень и перспективы развития электроискрового легирования металлических поверхностей / Н.И. Лазаренко.- Москва :Электронная обработка материалов, 1967. – 5 с.
5. Лазаренко Н.И. Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами / Н.И. Лазаренко. – Москва :Электроискровая обработка металлов, 1957. – 70 с.
6. Палатник Л. С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий / Л.С. Палатник. – Москва : Электроискровая обработка металлов, 1935. – 433 с.
7. Сумин В.И. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез карбидборидов титана, разработка и применение износостойких композиционных сплавов на их основе / В.И. Сумин. – Свердловск :Металлургия, 1978. – 3 с.

Использование полимерного связующего в агломерации

Волков Д. Н., Мамонов А.Л., Шатохин Д. А., Парфенов А. А.

ОАО «Высокогорский горнообогатительный комбинат», г. Нижний Тагил

Кормина И. В.

ООО «Полипласт – УралСиб», Екатеринбург

По мере увеличения добычи бедных железных руд в агломерационных шихтах отечественных аглофабрик неуклонно повышается доля тонких железорудных концентратов. Использование в составе агломерационной шихты большой доли мелкодисперсного сырья снижает степень окомкования и, соответственно, ее газопроницаемость, что приводит к ухудшению технико-экономических показателей агломерационного процесса.

Одним из наиболее рациональных способов регулирования степени окомкования аглошихты является применение связующих добавок.

Учитывая большие энергетические и материальные затраты на производство обожженной извести и необходимости производства «кислого» агломерата разработана

и внедрена технология окомкования аглошихты на основе инновационных связующих добавок.

Российским производителем добавок является компания ООО «Полипласт УралСиб», выпускающая специализированную для ГОК линейку добавок серии «Термопласт СВ».

Данные добавки представляют собой водорастворимые поверхностно-активные вещества, содержащие смесь производных органических кислот с различными полярными и неполярными функциональными группами, молекулярной массой и степенью полимеризации.

Проведены лабораторные и опытно-промышленные испытания, в результате которых получены следующие результаты:

- увеличение удельной производительности агломашин на 17,4 %;
- зафиксировано снижение расхода кокса на 9,0 %;
- удельные расходы газа, воздуха и электроэнергии снизились на 10,3 %; 10,4 % и 12,0 %, соответственно.

Влияния связующей добавки на изменение химического состава и прочностных характеристик агломерата не зафиксировано.

Ключевые слова: агломерат, газопроницаемость, аглошихта, окомкование, добавка.

По мере увеличения добычи бедных железных руд в агломерационных шихтах отечественных аглофабрик неуклонно повышается доля тонких железорудных концентратов. Известно что, использование в составе агломерационной шихты большой доли мелкодисперсного сырья, вызывает ухудшение ее газопроницаемости, что приводит к снижению [1, 2]:

- скорости фильтрации газа;
- интенсивности теплообмена и процессов спекания;
- удельной производительности агломашин;
- качества агломерата.

Это также увеличивает выбросы экологически вредной пыли с аглогазами.

Хорошая газопроницаемость аглошихты нужна для того, чтобы при относительно небольших перепадах давления над и под слоем объем газов, образующихся при горении топлива, успевал проходить через межчастичные каналы слоя [1, с. 187]. Величину перепада давления можно выразить формулой:

$$\Delta p = \lambda \frac{H}{d_{\text{экв}}} \frac{\rho_g}{2} w^2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}, \quad (1)$$

где H – высота слоя;

$d_{\text{экв}}$ – эквивалентный размер частиц шихты;

ε – пористость слоя;

ρ_g – плотность газа; коэффициент гидравлического сопротивления;

w – скорость фильтрации газа в агломерируемом слое.

Анализ формулы показывает, что повышение скорости прохождения газа при сохранении постоянным Δp возможно при увеличении размера частиц шихтовых материалов ($d_{\text{экв}}$).

Таким образом, особое значение в технологии агломерации приобретает предварительное окомкование шихты, которое заключается в формировании гранул размером от 2 до 8 мм и направленное на повышение газопроницаемости слоя. Окомкование оказывает влияние не только на величину $d_{эКВ}$ гранул, но и на способность сохранять полученный в результате окомкования гранулометрический состав [3, с.85].

Залогом достижения высоких технико-экономических показателей агломерационной технологии является организация эффективного процесса окомкования, что обеспечивает интенсивное поступление кислорода воздуха в спекаемый слой, необходимое для горения частичек твердого топлива, требуемую сегрегацию частиц по высоте слоя и высокую прочность гранул при переносе тепловой энергии в слое шихты. Одним из наиболее рациональных способов регулирования степени окомкования аглошихты является применение связующих добавок. Данный способ позволяет управлять процессом окомкования с минимальными энергозатратами, исключает изменение конструктивных элементов окомкователей и усложнение существующей на конкретном предприятии технологии в целом.

На большинстве отечественных аглофабрик в качестве связующих добавок применялись водные растворы полиакриламида, гумата натрия, поливинилацетата, жидкого стекла, сульфитного щелока, железного купороса, подогретого до 60–70 °С мазута и обожженной извести. Использовалась также вода после специальной магнитной обработки и предварительно намагниченная шихта. Единственной добавкой, доказавшей свою технико-экономическую эффективность, оказалась обожженная известь и поэтому увеличение количества извести в агломерационной шихте для ее эффективного окомкования до сих пор считается основным методом повышения производительности агломашин и качества агломерата, несмотря на достаточно высокий расход извести до 70–75 кг/т агломерата [1, с.301]. Учитывая большие энергетические и материальные затраты на производство обожженной извести, необходима разработка и внедрение инновационных связующих добавок, обеспечивающие высокую эффективность агломерационного производства при низких затратах.

В настоящее время в мировой химической промышленности для агломерации шихты выпускаются несколько добавок, таких как «*Peridur*» и «*Floroform*», имеющих довольно высокую стоимость. Российским производителем добавок аналогичного назначения является компания ООО «Полипласт УралСиб», выпускающая специализированную для ГОК линейку добавок серии «Термопласт СВ» при более низкой цене, по сравнению с импортными аналогами.

Данные добавки представляют собой водорастворимые поверхностно-активные вещества (ПАВ), содержащие смесь натриевых и полиалкиленоксидных производных полиметиленафталинсульфоокислот с различными полярными и неполярными функциональными группами, молекулярной массой и степенью полимеризации.

Молекулы ПАВ, растворенные в воде, передвигаются от выпуклых поверхностей к вогнутым или плоским и способны заполнять поры и капилляры, способствуя тем самым проявлению стягивающего усилия между частицами и формированию адгезионных контактов. Предварительными исследованиями было установлено, что наличие полиалкиленоксидных групп в макромолекулах ПАВ улучшает их адгезию по отношению к гидрофильной поверхности частиц железорудного концентрата. Смачивающая способность ПАВ по отношению к гидрофобной поверхности твердого топлива (кокса) в аглошихте увеличивается с повышением количества карбоксильных групп в макромолекулах ПАВ. Также наличие в макромолекулах ПАВ несвязанных разнородных функциональных групп обеспечивает их высокую адгезию как по отношению к полярной поверхности рудных частиц, так и по отношению к неполярной поверхности частиц твердого топлива. В связи с этим появляется возможность расположения частиц кокса не в объеме гранулы окомкованной шихты, а на ее поверхности, что должно интенсифицировать процессы спекания и формирования агломерата.

Таким образом, специфическая способность водорастворимых ПАВ изменять свойства поверхности частиц аглошихты, содержащие одновременно разнородные, как связанные, так и не связанные между собой функциональные группы, позволяет достичь высокой степени окомкования и получать гранулы, устойчивые к разрушению, создавая предпосылки для увеличения высоты слоя шихты и улучшения ее газопроницаемости. Подбор добавок осуществляется индивидуально под конкретную шихту.

Эффективность полимерной добавки в агломерационном процессе определяется следующими факторами:

- улучшение смачивания поверхности рудных и коксовых частиц водным раствором полимера приводит к интенсификации процесса окомкования, снижению доли мелких частиц концентрата и увеличению газопроницаемости столба шихты и интенсификации горения топлива;

- упрочнение гранул шихты за счет полимерной связки приводит к росту их влагостойкости, и они в меньшей степени разрушаются в зоне переувлажнения нижних слоев, также способствуя увеличению газопроницаемости столба шихты и интенсификации горения топлива;

- разделение рудных гранул и частиц кокса способствует ускорению горения топлива и повышению производительности агломерационных машин;

- все вышеперечисленные факторы локализуют зону горения кокса, поднимают в ней температуру и способствуют спеканию и упрочнению агломерата.

Для определения эффективности применения полимерной добавки в условиях агломерационного производства ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат» (ВГОК) предварительно выполнили серию лабораторных спеканий. В параллельных базовых спеканиях основные показатели процесса были близки между собой. Степень окомкования состави-

ла $94,0 \pm 0,1$ %, а вертикальная скорость спекания $-4,09 \pm 0,02$ мм/мин. При выходе годного агломерата фракции более 5 мм – 81,3 %, удельная производительность в базовых спеканиях составила $0,312 \pm 0,12$ т/м²час. Прочность базового агломерата находилась на достаточно высоком уровне и соответствовала действующим техническим условиям:

- выход класса более 5 мм в стандартном барабане $B_{+5\text{мм}} = 72,4 \pm 2,8$ %,
- выход класса менее 0,5 мм – $B_{-0,5\text{мм}} = 8,2 \pm 2,0$ %.

Добавку «Термопласт 5СВ» испытывали в двух параллельных опытах. Разбег в значениях показателей процесса несколько выше, чем в базовых спеканиях, видимо, из-за сложности распределения малого количества связующего (~0,3 %) при ручном перемешивании шихты. Однако, значения показателей в обоих параллельных опытах лучше, чем в базовых. Степень окомкования достигла $97,4 \pm 1,0$ % и, как минимум, на 2 % выше базовой. Вертикальная скорость спекания увеличилась до $4,6 \pm 0,4$ мм/мин, что значительно выше наибольшего достигнутого значения в базовых спеканиях.

В качестве шихты для агломерации использовались: железорудный концентрат ММС ВГОК, кокс, сидерит сырой, агломерационный возврат технологическая добавка «Термопласт 5СВ».

Основные результаты лабораторных испытаний полимерных связующих добавок «Термопласт 5СВ» в количестве 3,05 кг/т шихты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты лабораторных спеканий

Показатели	Без добавки	С добавкой
Состав шихты, %		
к-т ММС	55,9	55,9
сырой сидерит	25,3	25,3
КОС	18,8	18,8
Возврат, (сверх 100 %)	30,0	30
Кокс, (сверх 100 %)	6,2	6,2
Влажность шихты, %	8,0	7,8
Степень окомкования шихты, %	94,1	97,4
Высота слоя, мм	225	240
Вертикальная скорость спекания, мм/мин	4,09	4,61
Выход годного агломерата, %	81,3	85,0
Производительность, т/м ² ч	0,312	0,361
Гранулометрический. состав агломерата, %:		
+40 мм	45,6	57,9
+25 мм	10,7	8,8
+15 мм	6,6	5,8
+10 мм	4,7	3,7
+5 мм	13,7	8,8
-5 мм	18,7	15,0
Прочность, +5 мм, %	72,4	73,5
Истираемость, -0,5 мм, %	8,2	8,2

Средняя производительность установки за вычетом некондиционного класса 0–5 мм выросла по сравнению с базовыми спеканиями на 15,7 % и достигла 0,361 т/м²час.

Несмотря на более короткое время нахождения материала в зоне высоких температур из-за увеличенной вертикальной скорости спекания, прочность агломерата в стандартном барабане по выходу класса более 5 мм равна $73,5 \pm 1,6$ % и выше, чем средняя в базовых спеканиях. Причина получения более прочного агломерата заключается в более интенсивном горении топлива в шихте с повышенной газопроницаемостью и, соответственно, с локализацией высокотемпературного поля.

Применение связующей добавки «Термопласт 5СВ» в шихте благотворно отразилось на ее окомковании. Визуально шихта с полимерной добавкой выглядит более равномерно окомкованной. Степень окомкования по сравнению с базовой выросла на 3,3 %.

Вертикальная скорость спекания по сравнению с базовой выросла на 12,7 % при сохранении высоких показателей прочности агломерата. Это позволило рекомендовать добавку «Термопласт 5СВ» для промышленных испытаний и предполагать прирост производительности агломерационной машины не менее, чем на 10 %.

В период с 13 по 15 октября 2015 г были проведены опытно-промышленные испытания производства железорудного агломерата для Челябинского металлургического комбината (ЧМК) с использованием добавки «Термопласт 5СВ».

Для подачи в шихту добавки «Термопласт 5СВ» был выделен шихтовый бункер емкостью 100 м³. Выгрузка добавки из бункера производилась конвейером с шириной ленты 1 м и длиной 2 м, привод которого имел регулируемую скорость вращения.

Добавка с конвейера из-под бункера пересыпалась на сборный конвейер, предварительно загруженный шихтой. Шихта с добавкой после нескольких пересыпок подавалась в смеситель и затем в окомкователи машин.

Расход полимерной добавки определялся сотрудниками ООО «Полипласт» по данным инструментальных замеров скорости движения ленты и нагрузки на 1 м конвейера после бункера возврата. Качество готового агломерата определяло ОТК ВГОК по стандартной методике с каждой двух вагонов.

В базовом и опытном периоде (кроме настроенного) регулирование процесса спекания осуществлялось технологическим персоналом, который устанавливал скорость агломерационных машин, влажность шихты и величину нагрузки по визуальному контролю степени прогрева слоя и прочности агломерата, сбрасываемого с паллет.

Опытно-промышленные испытания подтвердили принципиальную возможность применения добавок «Термопласт СВ» в технологии агломерации. В табл. 2 и 3 представлены основные результаты опытно-промышленных испытаний. В табл. 2 приведены усредненные технологические показатели работы всех агломерационных машин и качество товарного агломерата в базовый и опытные периоды, а также усредненные данные по указанным периодам в целом по фабрике. В табл. 3 представлены теплотехнические параметры всех машин в базовый и опытный периоды.

Таблица 2

Сравнение показателей работы агломашин в базовом и опытных (ОП) периодах

Показатели		Без добавки	ОП1	ОП2
Дата		14.10	14.10 – 15.10	15.10
Время работы без простоев, час		9,13	10,50	13,05
Выпуск агломерата, т		1198,30	1751,15	2231,85
Удельная производительность, т/м ² час				
- расчетная по замерам без простоев		0,837	1,013	0,992
- фактическая по выпуску агломерата		0,583	0,741	0,760
Расход связующего, %:				
- общий, кг;		0	7 699	9 514
- удельный, кг/т шихты;		0	3,4	3,6
- удельный, кг/т агломерата		0	3,8	4,3
Степень окомкования, %		60,8	68,6	74,0
Влажность шихты, %		8,1	7,8	7,4
Состав шихты	К – т ММС	61,2	60,0	53,3
	КОС	13,3	15,6	17,3
	Сидерит	25,5	24,5	29,4
	Кокс (сверх 100 %)	4,5	4,7	4,8
Общий расход шихты, т/час		218	230	242
Скорость агломашин, м/мин:				
- по приборам		1,17	1,20	1,16
- по замерам		1,28	1,38	1,19
Высота слоя, мм		256	250	276
Характеристика воз- врата	Количество, %	27,3	27,4	21,5
	в т.ч. + 5 мм, %	16,1	17,3	11,4
Прочность по ГОСТ 15137 – 87, %	Кл. + 5 мм	60,0	66,2	67,8
	Кл. – 0,5 мм	8,8	9,0	8,2
	Фр. – 5 мм	10,3	10,4	10,3
Химический состав агломерата, %	Fe	57,0	56,8	57,0
	FeO	14,3	15,9	17,8
	S	0,02	0,02	0,03
	CaO/SiO ₂	0,45	0,44	0,44
	Zn	0,044	0,043	0,043

Таблица 3

Теплотехнические параметры работы агломашин в базовый и опытные периоды

Показатели	Средние значения периодов		
	базовый	ОП1	ОП2
Дата	14.10	14.10–15.10	15.10
Время	1:16 – 10:24	10:24 – 8:00	8:00 – 21:03
Разрежение перед эксгаустером, мм вод.ст.	902,2	925,5	912,4
Разрежение в коллекторе, мм вод.ст.	739,2	777,6	788,4
Падение давления при спекании, мм вод.ст.	163,0	147,9	124,0
Температура отходящих газов, °С	100,8	89,6	110,9
Высота слоя, мм	256	250	289
Расход природного газа:			
- по замеру, м ³ /час;	392,0	384,0	401,0
- по приборам, м ³ /час;	354,1	323,4	335,6
- удельный по замеру, м ³ /Т _{агл} ;	6,2	5,1	5,4
- удельный по прибору, м ³ /Т _{агл}	5,6	4,3	4,5
Удельный расход кокса по замерам, кг/Т _{агл} .	47,8	43,1	49,6

Результаты опытно-промышленных испытаний показали, что ввод полимерного связующего «Термопласт 5СВ» в железорудную часть шихты в количестве ~3,0 % позволил существенно улучшить комкуемость шихты. Степень окомкования в среднем поднялась с 60,8 до 71,3 %. Однако, эти значения при использовании полимера существенно ниже полученных в лабораторных опытах, где они достигали 97 %. Основная причина заключается в неоднородности окомкования шихты на разных машинах.

Опытные периоды – ОП1 и ОП2 – отличались различной высотой слоя шихты.

В периоде ОП1 высота слоя шихты была на уровне высоты слоя в базовом периоде. Улучшение процесса окомкования за счет полимерной добавки дало возможность увеличить скорость движения ленты при неизменной высоте слоя. В опытном периоде 1 (ОП1) средняя скорость агломерационных машин выросла на 7,8 % (с 1,28 м/мин до 1,38 м/мин). Ускорение движения ленты не привело к незавершенности процесса горения топлива, а тепловой уровень в слое несколько вырос. Об этом свидетельствует повышение содержания закиси железа в готовом агломерате с 14,3 % (в базовом периоде) до 15,9 % (в периоде ОП1) и прочности агломерата в барабане с 60,0 % (в базовом периоде) до 66,7 % (в периоде ОП1) при неизменном выходе возврата на уровне 27,4 %.

Увеличение скорости движения ленты без изменения количества возврата естественно привело к росту расчетной удельной производительности агломерационных машин. Средняя производительность фабрики поднялась приблизительно на 20 % и достигла 1,013 т/м²час при базовой 0,837 т/м²час.

Расчетные значения прироста производительности, полученные на основе разовых инструментальных замеров, подтверждаются данными

службы отгрузки готового агломерата, приведенными в табл. 2. За 1 час работы всех машин в базовом периоде производилось в среднем 131 т/час готового агломерата (0,583 т/м²час), а в периоде ОП1 без учета времени простоя – 167 т/час (0,741 т/м²час). Значения удельной производительности машин, определенные по фактически произведенному агломерату, ниже, чем по инструментальным замерам. Это объясняется тем, что при учете времени для производства определенной партии агломерата не вычитается время кратковременных остановок, связанных с техническими причинами.

Во втором опытном периоде на машинах № 3 и № 4 высоту слоя подняли с 250 мм до 285 мм и 293 мм соответственно. Для этих машин разрежение в коллекторе было равно 767,5 мм вод.ст. и 809,2 мм вод. ст. Этих величин оказалось достаточно для нормального спекания с практически полным сгоранием кокса. О высоком тепловом уровне в высоком слое свидетельствуют ряд факторов:

- температура отходящих газов оказалась выше, чем в базовом режиме, и превысила 100 °С; следовательно, в нижних слоях топливо сгорело и спекание агломерата завершилось в полном объеме;

- содержание закиси железа в готовом агломерате увеличилось с 14,3 % в базовом периоде до 17,8 % в периоде ОП 2.

Увеличение времени и интенсивности тепловой обработки слоя повышенной высоты естественно отразилось на качестве агломерата. Прочность товарной продукции поднялась, как по сравнению с базовым периодом (на 7,8 %), так и с опытным периодом 1 (на 1,6 %), достигнув величины 67,8 %. При этом доля возврата сократилась с 27,4 % (периоды базовый и ОП1) до 21,5 %.

Снижение выхода возврата в периоде ОП2 обеспечило рост средней удельной производительности всех машин, определенной по инструментальным разовым замерам на 18 %. Даже более высокий рост производительности рассчитан по объему выпуска агломерата за время периода ОП2 (табл. 2). В этом случае рост производительности достигает 30 %.

Таким образом, установлено, что наиболее эффективно полимерная связующая добавка действует в случае спекания в повышенном слое. Это объясняется тем, что за счет повышения газопроницаемости хорошо окомкованной шихты, которая не размокает в зоне переувлажнения, удастся полностью сжечь кокс в повышенном слое и увеличить время его тепловой обработки шихты за счет локализации зоны горения и сокращения тепловых потерь в окружающую среду. В результате повышается прочность агломерата и увеличивается выход годной товарной продукции при сокращении количества возврата.

Проведенные кратковременные промышленные испытания позволили установить улучшение следующих показателей за счет ввода в шихту полимерной связующей добавки «Термопласт 5СВ» в количестве 4,3 кг/т агломерата:

- рост производительности агломерационных машин не менее чем на 18 %;
- снижение расхода природного газа не менее чем на 12 %;
- снижение расхода электроэнергии не менее чем на 10 %;
- снижение расхода кокса не менее чем на 10 %.

Полученные результаты позволили оценить ожидаемый экономический эффект от внедрения технологии агломерации с вводом в шихту полимерной связующей добавки.

В связи с достигнутым положительным технологическим и экономическим эффектом при введении полимерной добавки в шихту железорудного агломерата сделан вывод о целесообразности внедрения новой технологии. На первом этапе внедрения необходимо было провести кампанию по производству агломерата для ЧМК длительностью не менее 1 месяца для выхода на оптимальные режимы процесса по всем агломерационным машинам.

В период с 17 мая по 1 августа 2017 г. проведены промышленные испытания использования связующей добавки «Термопласт 5СВ» в шихте железорудного агломерата.

Дозировка связующего на сборный конвейер осуществлялась через гибкий безосевой шнековый транспортер. Расход связующего поддерживался постоянным – 0,38 % от массы шихты.

Наиболее показательными оказались периоды 1–7, 14–23 и 27–31 июля. Доля агломерата произведенного с привлечением связующего составила 88 %. Средняя удельная производительность – 0,877 т/м²час. Средние данные этих периодов приведены в табл. 4, в сравнении с базовыми показателями производства в апреле.

Таблица 4

Сравнение показателей работы агломашин в базовый и опытный периоды 2017 г

Показатели	Базовый период	Опытный период
Период	1-23 апреля 2017 г	июль 2017 г
Состав шихты, %		
к-т ММС	72,1	73,1
Сидерит + аглоруда	27,9	26,9
Кокс.мелочь (сверх 100 %)	5,33	4,85
Параметры работы агломашин		
Высота слоя шихты, мм	200	204
Влажность шихты, %	6,3	6,1
Скорость движения ленты, м/мин	1,12	1,38
Температура отходящих газов, °С	80	86
Разряжение в коллекторе, мм.вод.ст.	563	582
Разряжение перед эксгаустером, мм.вод.ст.	643	706
Расход природного газа, м ³ /т	9,04	8,11
Расход воздуха на зажигание, м ³ /т	106,61	95,49
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	53,77	47,31
Выход возврата, %	27,5	25,4
Удельная производительность, т/м ² ч	0,747	0,877
Изменение производительности, %	-	+ 17,4

Качество агломерата		
Прочность, Б+5, мм	67,3	67,4
Истираемость, Б-0,5, мм	7,9	7,8
Содержание класса +5 мм, %	10,4	10,4
Химический состав агломерата, %		
Fe	57,0	56,9
S	0,016	0,019
FeO	16,4	14,9
CaO	3,65	3,54
SiO ₂	8,4	8,5
Основность	0,43	0,42
MgO	3,4	3,3
TiO ₂	0,63	0,47
Mn	1,21	1,28
Al ₂ O ₃	3,4	3,5
Zn	0,042	0,042

По результатам, представленным в табл. 4, отмечено:

- удельная производительность агломашин увеличилась относительно спекания без добавки на 17,4 %, за счет увеличения газопроницаемости шихты и скорости спекания;
- скорость аглолент возросла на 23,2 % (отн.);
- прочность агломерата сохранилась на прежнем уровне;
- влияния связующей добавки на химический состав агломерата не зафиксировано;
- отмечено снижение расхода кокса на 9,0 % (отн.);
- за счет увеличения производительности агломашин удельные расходы газа воздуха и электроэнергии снизились на 10,3 %, 10,4 % и 12,0 %, соответственно.

В период испытаний многократными замерами зафиксировано положительное влияние связующего «Термопласт 5СВ» на гранулометрический состав шихты. Содержание нежелательной фракции -1,6 мм в составе шихты снизилось с 31,3 до 24,6 %.

Отмечено также, что общеизвестная обратная зависимость удельной производительности агломашин от содержания концентрата ММС в шихте изменяется в более благоприятную сторону, при использовании связующего «Термопласт 5СВ». При увеличении доли концентрата ММС сверх оптимального значения (до 76–77 %), величина удельной производительности агломашин остается относительно стабильной. Неизбежное ее снижение фиксируется только при содержании концентрата более 77,0 %. Другими словами, привлечение связующего «Термопласт 5СВ» позволяет повысить пороговое содержание концентрата ММС в шихте.

Выводы по результатам промышленных испытаний.

1. Опробованный способ подачи связующего «Термопласт 5СВ» обеспечивает необходимую точность дозировки.

2. Увеличение удельной производительности агломашин составило 17,4 %.
3. Зафиксировано снижение расхода коксовой мелочи на 9,0 %.
4. Удельные расходы газа, воздуха и электроэнергии снизились на 10,3 %, 10,4 % и 12,0%, соответственно.
5. Влияния связующей добавки на химический состав и прочностные характеристики агломерата не зафиксировано.
6. Применение связующей добавки «Термопласт 5СВ» рекомендовано к промышленному применению на постоянной основе.

Библиографический список

1. Пузанов, В. П. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз / В.П. Пузанов, В.А.Кобелев. – Екатеринбург : УрО РАН, 2001. – 634 с.
2. Базилевич, С. В. Агломерация /С.В.Базилевич, Е.Ф.Вегман. – М. : Metallurgia, 1967. – 368 с.
3. Жилкин, В. П. Производство агломерата. Технология, оборудование, автоматизация / В.П. Жилкин, Д.Н. Доронин. –Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2004. – 292 с.

Галлий в рудах Качканара и перспективы его использования

Володина Ю. В.

АО«ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат», г. Качканар

В статье рассматриваются условия возможного получения редкоземельного металла –галлия встречающегося в рудах Гусевогорского месторождения Качканарского рудного поля. Определены условия его нахождения в рудах, как рассеянного элемента, не образующего самостоятельных минералов. Проведено исследование его геохимических особенностей и связей с железом, алюминием и цинком. Опираясь на минеральный и химический состав титаномагнетитового концентрата и хвостов ММС, получаемых на ЕВРАЗ КГОК и универсальные законы геохимии, можно сделать вывод, что галлий попадает в железорудное сырье. Откуда, при доменном переделе, предположительно, уходит в шлак, совместно с алюминием (вследствие геохимического средства). Или, возможно, в доменные газы, после чего осаждается при очистке доменного газа в шламах и колошниковую пыль (вследствие геохимического средства с цинком). Для подтверждения данных предположений необходимо провести дополнительное опробование отходов металлургического передела. Анализ результатов опробования позволит определить направление дальнейшей работы и экономическую целесообразность извлечения ценного металла.

Ключевые слова: Качканарская группа месторождений; галлий; алюминий; обогащение; доменный передел.

ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат разрабатывает Гусевогорское месторождение титаномагнетитовых малотитанистых ванадийсодержащих руд. Получаемый концентрат окомковывается и транспортируется на ЕВРАЗ Нижне-Тагильский металлургический комбинат. Там в

процессе доменного передела получают чугун и шлак, а так же образуются отходы в виде шламов и пыли.

Гусевогорское месторождение входит в состав Качканарского рудного поля и является составной частью одноименного пироксенитового массива [1]. Гусевогорский пироксенитовый массив сложен пироксенитами, верлитами (перидотитами), горнблендитами, габбро и жильными породами – плагиоклазитами, пироксен-аплитами, габбро-пегматитами [2]. Титаномагнетитовое оруденение представлено, в основном, вкрапленностью титаномагнетита и ильменита в безоливиновых рудных (диаллаговых), амфиболизированных (роговообманковых) и фельдшпатизированных (плагиоклазовых) пироксенитах, верлитах. Наряду с Гусевогорским, в рудное поле входит аналогичное Собственно-Качканарское месторождение.

Наряду с извлекаемым в настоящее время железорудным концентратом, руда месторождения содержит повышенные значения титана, ванадия, золота, металлы платиновой группы и редкоземельные металлы. С самого начала разработки месторождения, проводилось изучение возможностей дополнительного извлечения попутных компонентов. Отработка данных элементов находится в стадии промышленной отработки, опытно-промышленных испытаний или исследований.

Одним из элементов, привлекающих внимание исследователей, является галлий. Изучение примесей РЭ, в т.ч. галлия проводил Усков Е.Д., который выявил его повышенную концентрацию в титаномагнетите (до 0,004%) и связал это с железом [3]. Галлий является типичным рассеянным элементом и в рудах Качканаране образует собственных минералов. Но по геохимической классификации галлий отнесен к халькофильным элементам, так как имеет сродство с цинком и литофильным элементам, так имеет сродство с алюминием [4]. О сродстве с алюминием так же говорит Шаратов И.П. [5], хотя и допускает сродство с цинком. Кроме того, проведенный автором корреляционный анализ по хвостам ММС показывает высокую корреляционную связь ($R^2 = 0,8$) галлия с алюминием (рис.1) и практическое отсутствие такой связи с железом.

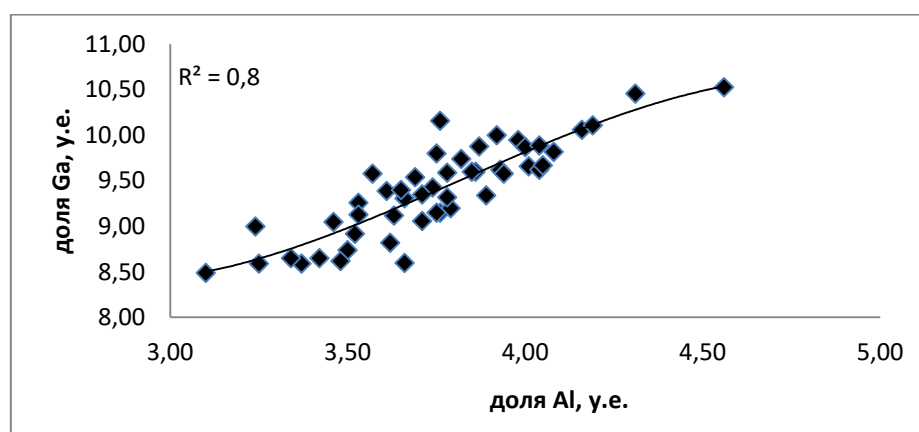


Рисунок 1. Зависимость доли галлия от доли алюминия в хвостах ММС

Об этом косвенно свидетельствуют так же данные Ускова Е.Д. В частности, в мономинеральных пробах, повышенные значения (до 0,002%) галлия наблюдаются в роговой обманке и плагиоклазе, которые имеют в своем составе алюминий, а значит, меньше содержания галлия в пироксенах и оливине, не содержащих алюминия. Надо сказать, что в хвостах ММС отсутствует корреляция доли цинка и галлия, а также галлия и железа.

Возникающее противоречие устраняется, если мы определим вещественный состав титаномагнетитового концентрата более подробно. По данным Фоминых В.Г. и др. [6] в титаномагнетите Качканарского массива наблюдаются пластинчатые вростки шпинели (плеонаста с содержанием до 30 % герцининовой молекулы). Встречается так же и цинк содержащая шпинель - ганит. Данные вростки имеют размеры до сотых долей миллиметра и при выделении монофракций, а тем более при обогатительном переделе, остаются в концентрате. Об этом свидетельствует и наличие глинозема в концентрате КГОК, где содержание алюминия достигает 2,5%, а так же цинка (до 0,015%). А отсутствие корреляции с цинком в хвостах ММС говорит о преобладании галлия в данном продукте, из породообразующих минералов. Таким образом, можно говорить, что значительная часть галлия, попадает в концентрат и в дальнейшем, в железорудное сырье (ЖРС).

Интересна дальнейшая судьба галлия, попавшего с ЖРС в доменный передел. Поведение элементов при металлургическом переделе по закону аналогичности, в целом подчиняется законам физической химии, так же как и в магматическом очаге. Соответственно концентрируясь на барьерах, аналогичным геохимическим барьерам. При доменном переделе ЖРС Качканарского комбината алюминий переходит в шлак, где доля глинозема достигает 16-17%. Учитывая близкую связь между алюминием и галлием, можно предположить, что галлий так же уходит в доменные шлаки. То есть доля галлия в шлаках возрастает пропорционально доле алюминия, это примерно в 5,5 раз. Тогда доля галлия может достигать в шлаках 0,02 % или 200 г/т, что вполне сопоставимо с промышленным обогащением. Так как доменный шлак ЕВРАЗ НТМК используется для производства щебня, то в качестве сырья можно взять фракцию 0-10 мм, остающуюся при дроблении шлака, как малоиспользуемое сырье.

Цинк при доменном переделе испаряется (температура кипения 905 °С [7]) и осаждается при очистке доменного газа в шламах ЦУШ и колошниковой пыли. По данным [8] галлий в золе ТЭЦ при температуре более 1000°С выносятся из зоны высоких температур и конденсируются в электрофильтрах. То есть, возможно, что в НТМК галлий уходит вместе с цинком. По данным НТМК доля цинка в шламах ЦУШ достигает 0,7%, а колошниковой пыли 0,3 %. Если считать что доля галлия растет пропорционально доле цинка, то в шламах доля галлия может достигать 0,18%, а в колошниковой пыли 0,1%.

Для подтверждения этого, и определения дальнейшей концентрации металла, необходимо провести опробование шлаков, шламов и колошниковой пыли и сделать анализ на галлий. Если наше предположение подтвердится, то можно говорить об экономически выгодном извлечении данного металла. Так как нет необходимости извлекать сырье из недр, а так же то, что оно в достаточной степени раздробленное.

Таким образом, напрашивается вывод о возможности извлечения галлия из отходов переработки доменных шлаков или шламов и колошниковой пыли. Но данное предположение требует дополнительной проверки, поэтому необходимо провести анализ доменных шлаков, шламов и колошниковой пыли на наличие галлия. И, исходя из полученных результатов, определить дальнейшее использование определенного вида отходов, разработать возможную технологическую схему их переработки и рассчитать экономический эффект извлечения ценного металла.

Библиографический список

1. Иванов О. К. Концентрически-зональные пироксенит-дунитовые массивы Урала: (Минералогия, петрология, генезис). – Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 1997. - 488 с.
2. Фоминых В.Г. и др. Петрология и рудогенезис Качканарского массива / В.Г. Фоминых, В.П. Краева, Н.В.Ларина. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987.-84с.
3. Усков Е.Д. Элементы-примеси в рудах Гусевогорского и Собственно-качканарского месторождений титаномагнетита (Средний Урал) //Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. ИМ-ГРЭ. М. 1977 г.
4. Химия и технология редких и рассеянных элементов, под ред. К. А. Большакова, 2 изд., Уч. Пособие. т. 1, М., Высшая школа.1976, 368 с.
5. Шарапов И.П. Элементы-примеси в рудах, их опробование и подсчет запасов: Уч. пособие.- Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 1994. – 216 с.
6. Фоминых В.Г. и др. Петрология и рудогенезис Качканарского массива / В.Г. Фоминых, В.П. Краева, Н.В.Ларина. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987.- 184с.
7. Манзор Д.Э, Тлеугабулов Б.С. Расчетно-теоретическое исследование жидкофазной переработки сталеплавильных шлаков ОАО «НТМК» //JuvenisScientia № 1. – 2015. Технические науки. Ст. 8-12.
8. Адеева Л.Н., Борбат В.Ф. Зола ТЭЦ – перспективное сырье для промышленности// Вестник Омского ун-та №2. – 2009 г. Ст. 141-151.

Выбор конструктивных параметров роторной печи для сушки и обезмасливания углеродсодержащих материалов и прокатной окалины

Горшкова О. С.

Матюхин В. И., магистр, канд. техн. наук, доц.
УрФУ, г. Екатеринбург

Возрастающее накопление техногенных отходов, удорожание энергоресурсов и шихтовых материалов, ужесточение природоохранных нормативов приводят к необходимости поиска экономичных и эффективных способов и оборудования для переработки и возврата в производство металлоотходов. В данной работе представлена установка

для переработки маслосодержащих отходов и окалины. В основу реализуемого способа обезмасливания положена технология возгонки масла за счет непосредственного нагрева окалины дымовыми газами, что обеспечивает устойчивость и высокую производительность процесса.

Ключевые слова: маслосодержащие отходы, окалина, утилизация, технологическая установка, оптимизация.

Предлагаемая технология основывается на низкотемпературной обработке замасленной окалины высокоскоростным потоком продуктов полного сжигания топлива в установке вихревого (циклонного) типа [1]. При этом удаление масла и воды производится путем их возгонки при нагреве материалов до температуры 400...450°C. Поток теплоносителя образуется в результате факельного сжигания топлива при минимуме избытка воздуха. В результате в нагреваемых газах отсутствует свободный кислород или его концентрация незначительна, что предотвращает воспламенение паров масла в рабочем пространстве реактора.

Схема установки показана на рис. 1. Устройство имеет циклонную камеру (реактор) (4) с тангенциальным подводом теплоносителя через патрубок (3). Реактор размещается под углом к горизонту примерно 1-3 градуса. Внутри реактора вращается устройство пересыпания (ротор) (5) с лопатками длиной примерно равной длине реактора, имеющими диаметр, меньший диаметра реактора. Исходный материал через патрубок (6) подается в реактор и движется навстречу потоку газов в осевом направлении. При вращении лопаток слой перемещается по спирали вдоль наклонного корпуса реактора. Изменяя число оборотов электропривода ротора (2), можно управлять временем обработки материала в реакторе. Готовый продукт выгружается через патрубок (1).

В представленной работе на основании разработанной методики теплотехнических расчетов конструкции барабанной роторной сушилки рассмотрено влияние технологических параметров реализации тепловой обработки замасленной окалины на конструктивные размеры реактора (диаметр и длина). Основными факторами для исследования были выбраны:

- x_1 – производительность по исходному материалу в пределах от 50 до 2000 кг/ч;
- x_2 – содержание масла в исходном материале в пределах от 0 до 10 %;
- x_3 – влажность исходного материала в пределах от 0 до 30 %;
- x_4 – температура в рабочем пространстве в пределах от 50 до 600 °C;
- x_5 – степень удаления влаги в исходном материале в пределах от 30 до 100 %.

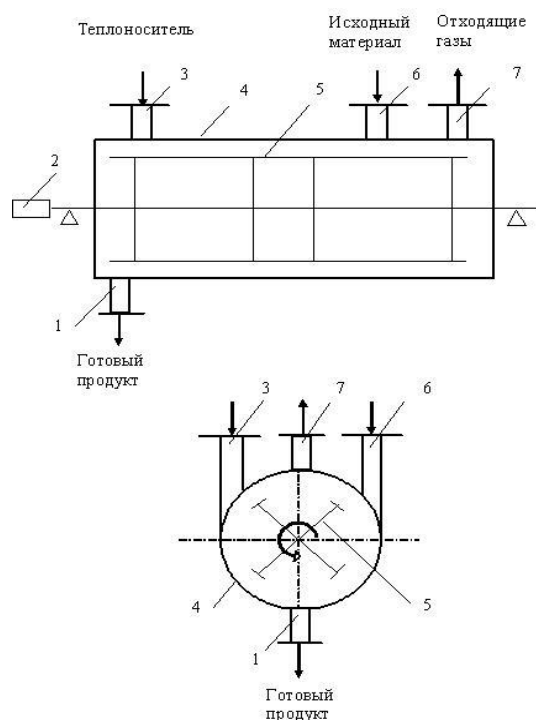


Рисунок 1. Схема установки для утилизации маслосодержащих отходов:
1,3,6,7 – патрубок; 2 – электропривод; 4 – реактор; 5 – ротор

Исследования проводились в соответствии с планом ротатбельного планированного эксперимента второго порядка.

После обработки экспериментальных данных были определены уравнения регрессии, описывающие изменения диаметра реактора и длины реактора; x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – представлены в условных единицах:

$$Y_1 = 7,029 + 0,181x_1 + 0,017x_2 - 0,027x_3 - 0,15x_4 - 0,08x_5 + 0,495x_1^2 + 0,565x_2^2 + 0,566x_3^2 + 0,565x_4^2 + 0,566x_5^2 - 0,05x_1x_3 - 0,05x_1x_4 - 0,05x_1x_5 - 0,025x_2x_3 + 0,025x_2x_5 + 0,225x_3x_4 + 0,25x_3x_5 + 0,225x_4x_5;$$

$$Y_2 = -1,55 + 0,231x_1 + 0,039x_2 - 0,05x_3 - 0,19x_4 - 0,08x_5 + 0,631x_1^2 + 0,701x_2^2 + 0,701x_3^2 + 0,719x_4^2 + 0,701x_5^2 + 0,019x_1x_2 - 0,02x_1x_3 - 0,06x_1x_4 - 0,02x_1x_5 - 0,04x_2x_3 - 0,01x_2x_4 + 0,006x_2x_5 + 0,281x_3x_4 + 0,319x_3x_5 + 0,281x_4x_5.$$

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости изменения внутреннего диаметра барабана (2а) и его длины (2б) реактора от производительности, содержания масла и влаги исходного материала.

Анализ полученных зависимостей показал, что с увеличением необходимой производительности агрегата до 830 кг/ч, содержания масла до 6 % и влаги в окалине до 15 % требуется все меньший диаметр агрегата (до 0,76 м), а его длина сокращается до 1 м.

При больших значениях отмеченных факторов требуется больший внутренний диаметр барабана при увеличенной его длине. Такой характер влияния исследованных факторов связан с особенностями тепловой работы роторной сушилки.

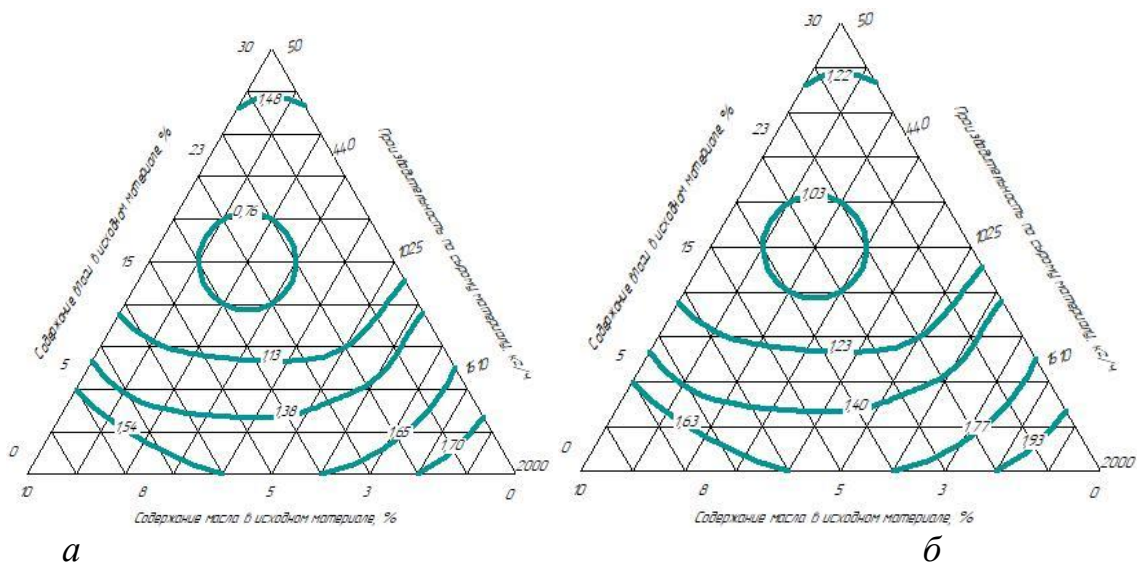


Рисунок 2. Экспериментальная зависимость изменения диаметра (а) и длины (б) реактора от производительности, содержания масла и влаги исходного материала

Полученные зависимости позволяют прогнозировать геометрические размеры предлагаемого реактора без проведения сложных теплотехнических расчетов.

Библиографический список

1. Способ утилизации маслоокалиносодержащих отходов: а. с. № 2037541 Россия: G5/04 / В.П. Ульянов, А.Г. Злобин, Г.С. Умнов [и др.] // Открытия. Изобретения. 1995. С. 153.

Исследование необходимости замены мартеновского передела на электродуговой

Грузман В. М., д-р техн. наук, проф.

Вавилов Е. А.

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

С 1936 г. и по сей день расплав для фасонно-литейного цеха производят в мартеновских печах. В последние годы уровень брака в цехе самый высокий за всю его историю. Засор – основной вид брака. Задача – проанализировать организацию процесса мартеновской плавки и разливки стали с момента основания цеха до сегодняшнего дня и предложить техническое решение реализации применения ковшей объемом до 16 т.

Ключевые слова: Мартеновский передел, засор, дефект, емкость разливочного ковша.

В настоящее время фасонное литейное производство является основной заготовительной базой машиностроения. Оно позволяет получать детали сложной конфигурации с наименьшими затратами труда и энергии. Однако эта возможность далеко не полностью реализуется из-за повышенной дефектности отливок.

Мелкие песчаные раковины (засор) – главный дефект при литье в песчаные формы, в которых получают порядка 80–85% отливок и прочность которых намного меньше силового воздействия потока расплава, заполняющего форму. Кинетическая энергия расплава тем больше, чем больше его скорость и соответственно степень эрозии (размыва) поверхности песчаной формы. Засор – главный дефект отливок при литье в песчаные формы, а эрозия – главный его источник [1, с.5]. При заливке форм из стопорного ковша скорость расплава в полости формы определяется его объемом. В цехе сталеного литья с развесом отливок до 500 кг брак по засору составляет более 50 % от всего спектра брака. В тоже время заливка форм осуществляется из стопорного ковша объемом 32 т. Из таких ковшей заливают многотонные отливки. Научный руководитель выдвинул гипотезу, что такой ковш не мог быть заложен в проекте, а появился в цехе во время Второй Мировой Войны, когда сменилась номенклатура отливок. Была поставлена задача, проанализировать, организацию процесса мартеновской плавки и разливки стали с момента основания цеха.

До начала Великой Отечественной войны мартеновский цех в основном выплавлял сталь марки 20Л, для отливки деталей железнодорожных полувагонов. По условиям работы формовочного отделения потребное количество стали для единовременной заливки форм вагонных отливок определялось в 25–27 т. В связи с этим мартеновские печи работали на уменьшенной садке, и даже в этом случае почти от каждой плавки оставалось в среднем 5т металла, не залитого в формы. При такой технологии в мартеновском цехе были большие сливы металла, что приносило ежегодные убытки.

Усилия коллектива сталеплавильщиков были направлены на то, чтобы ликвидировать непроеизводительные потери металла.

Разливка стали по формам в двух разливочных пролетах требует точного деления стали по двум ковшам при выпуске плавки, учитывая, что садка печи составляла порядка 30 т естественно, что объем ковша для каждого пролета не превышал 16 т [2, с.30].

С началом войны Советской Армии потребовалось большое количество танков, и в кратчайший срок в мартеновском цехе была освоена выплавка специальных сталей марок «МБЛ», «СБЛ», «ВС», 32Х06Л для отливки литых деталей боевых гусеничных машин, по большинству броневых характеристик эти стали превосходили немецкие.

Из воспоминаний главного инженера предприятия Забайкина Алексея Васильевича, во время войны технолога цеха крупного фасонного броневое литья: «Серьезный вопрос, увеличения выплавки жидкой стали, четыре мартеновских и такое же количество электросталеплавильных печей не обеспечивали потребность в жидкой стали. Было построено дополнительно еще две мартеновские печи и установлено еще четыре электропечи, прибывшие из Харькова, с механизированной завалкой шихты, вместо

ручной завалки, внедрено скоростное сталеварение, увеличена садка мар-
теновских печей, с 36 до 60 т [3, с.20].

Судя по этим данным, можно выдвинуть предположение, что все эти мероприятия резко увеличили количество выдаваемой жидкой стали, а как следствие, и емкость ковша с 16 т до 32 т.

Библиографический список

1. Защитное покрытие сырых песчаных форм / В. М. Грузман, А. Ю. Лапина ; М-во образования и науки РФ ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т. (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – 76 с.

2. Ширяев А.Ф., Комаров К.И. «Совершенствование технологии литейного производства» Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы 1961г. –16с., с.30.

3. Забайкин А.В. «Металлурги и легендарный танк Т–34» «Тагильский краевед» №15,1995г. – 20 с.

Методы рационального режима загрузки доменных печей, оборудованных БЗУ

Зелепукин А. В.

Пыхтеева К. Б., канд. техн. наук, доц.

Тлеугабулов Б. С., канд. техн. наук, доц.

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Современные доменные печи оснащены бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ) лоткового типа. Основным технологическим недостатком БЗУ лоткового типа является невозможность создания окружной равномерности распределения многокомпонентной шихты. Особенно это касается периферийной зоны доменной печи, которая оказывает преобладающее влияние на ход плавки в целом. В работе рассмотрены методы рациональной загрузки периферийной зоны доменной печи с помощью БЗУ лоткового типа в условиях работы доменного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК». Расчеты вещественного состава периферийной зоны производили по специально разработанному алгоритму с использованием созданного программного обеспечения. В технологии доменного производства АО «ЕВРАЗ НТМК» за последние 10 лет произошли существенные изменения: увеличилась интенсивность плавки и интенсивность загрузки, повысилась масса подачи, изменился состав шихты. По результатам выполненных исследований и расчетов установлено, что существенное влияние на эффективность работы периферийной зоны оказывает общая масса железорудной части подачи и содержание окатышей в шихте. При увеличении массы подачи количество окатышей, попадающих к стенкам колошника, резко снижается. Снижение доли окатышей в шихте также снижает степень попадания окатышей к периферии. Распределение материалов по радиусу колошника имеет незначительное влияние. Полученные выводы подчеркивают дополнительную целесообразность максимально полной загрузки скипов. Для дальнейшего снижения доли окатышей в периферийной зоне необходимо более детально проработать мероприятия по снижению основности агломератов и увеличению расхода добавок.

Ключевые слова: доменная печь, шихта, загрузка, бесконусное загрузочное устройство (БЗУ), агломерат, окатыши.

Высокопроизводительная и экономичная работа доменной печи во многом определяется тем, как организовано движение и распределение газов и шихты в ее рабочем пространстве. Одним из основных факторов, влияющим на характер движения газов в печи, является распределение шихты на колошнике во время загрузки [1, 2].

В последние десятилетия, реконструируемые и вновь строящиеся доменные печи оснащаются исключительно бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ), главным образом, лоткового типа. Основное функциональное преимущество таких устройств заключается в возможности загрузки порции шихты в заданную точку или область колошника, что, в конечном итоге, и позволяет создавать оптимальный профиль засыпи на колошнике [3]. Эффективность же использования на доменных печах БЗУ во многом зависит от умения ими управлять [4]. Основным технологическим недостатком БЗУ данного типа является невозможность создания окружающей равномерности распределения многокомпонентной шихты [5, 6].

При реконструкции доменных печей АО «ЕВРАЗ НТМК» на них также были установлены БЗУ лоткового типа. Поэтому разработка рациональных методов загрузки печей для доменного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК» имеет высокую актуальность.

Выплавка чугуна в доменном цехе АО «ЕВРАЗ НТМК» характеризуется высокой интенсивностью плавки и низким расходом кокса из-за вдувания в больших количествах пылеугольного топлива и природного газа [7, 8]. Дутье нагревается до температуры свыше 1200 °С. Доменные печи, полезным объемом 2200 м³ каждая, имеют по две чугунных летки, по два литейных двора и по 22 фурменных прибора. Загрузка печей полностью автоматизирована, включает конвейерную доставку шихты от бункерной эстакады к скипам. Железородная часть шихты включает четыре основных и постоянных компонента: окатыши и агломерат Качканарского горнообогатительного комбината, железоблюк, доменный присад. Примерный вещественный состав железородной части доменной шихты: окатыши – 50,4 %; агломерат – 36 %; железоблюк – 9 %; доменный присад – 4,5 %.

Наличие нескольких компонентов в шихте усложняет оптимизацию режима загрузки и приводит к возникновению окружающей неравномерности в горизонтальных сечениях печи. Особенно это касается периферийной зоны доменной печи.

Загрузка печи осуществляется отдельными подачами. Каждая подача состоит из двух порций: порции кокса и порции железородной части шихты. И та, и другая порция формируется в бункерах БЗУ двумя скипами. Формирование структуры расположения материалов в бункере БЗУ определяется последовательностью набора компонентов шихты в скипы, геометрией конкретного бункера и углами естественного откоса различных материалов. Железородный материал располагают в бункере БЗУ в следующей последовательности: в нижней части (первый скип) – агломерат, в верхней части (второй скип) – окатыши.

Выгрузка кокса и железорудной части на колошник производится отдельно, чередуясь слоями. Характер и последовательность истечения материалов из бункера БЗУ определяется закономерностями образования и разрушения динамически неустойчивых сводов, создающих над выпускным отверстием эллипсоид разрыхления.

Протекание процессов в периферийной зоне доменной печи оказывает преобладающее влияние на ход плавки в целом, поскольку площадь данной зоны несоизмеримо больше центральной части и имеются более благоприятные условия для прохождения газа [9]. Для обеспечения эффективной работы периферийной зоны и снижения агрессивного воздействия на футеровку печи необходимо стремиться к минимизации попадания окисленных железорудных окатышей к стенкам. Решение этой задачи усложняется при высокой доле окатышей в шихте. Тем не менее, оптимизация отдельных параметров загрузки позволяет снизить расположение окатышей у стенок колошника.

Расчеты вещественного состава периферийной зоны производили по алгоритму, изложенному в работе [10], с использованием специального программного обеспечения [11]. При заданном (существующем) составе шихты, порядке загрузки и массе подачи у стен колошника неизбежно образуется сегмент, состоящий практически из одних окатышей (рис. 1).

Очевидно, что изменение порядка загрузки (первый скип – окатыши, второй – агломерат) еще больше увеличит долю окатышей у стен колошника.

В доменном производстве АО «ЕВРАЗ НТМК» за последние 10 лет существенно увеличилась интенсивность плавки. Удельная производительность возросла с 2,26 т/(м³·сут) в 2007 г до 3,1 – 3,3 т/(м³·сут) в настоящее время.

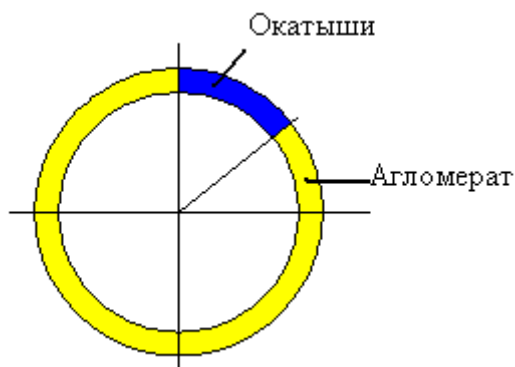


Рисунок 1. Характерное расположение материалов на периферии колошника

Сообразно изменению производительности увеличилась интенсивность загрузки (если до 2009 г в печи загружалось около 6–7 подач в час и, соответственно, 630–670 скипов в сутки, то в настоящее время, количество подач возросло до 9 в час, а в отдельные периоды и несколько более, и до 900 загружаемых скипов в сутки), а также масса подачи.

Исходя из вышеизложенных закономерностей выгрузки, на формирование периферийной зоны, кроме состава шихты, будет оказывать влияние общая масса подачи или степень заполнения бункера БЗУ. Влияние массы железорудной части подачи на содержание окатышей в периферийном кольце показано на рис. 2.

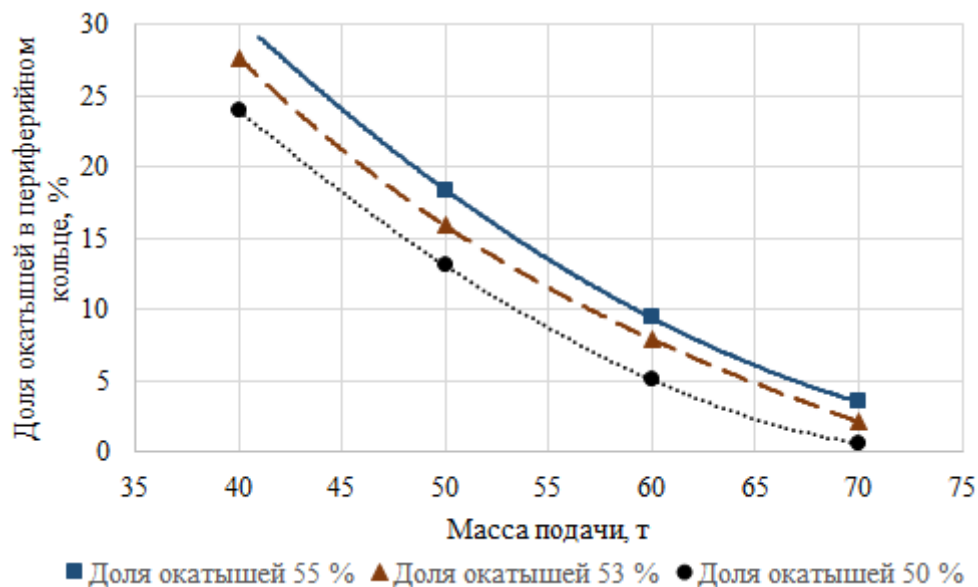


Рисунок 2. Влияние массы подачи на долю окатышей в периферийной зоне при различной доле окатышей в шихте

Как видно из рис. 2, при увеличении массы подачи количество окатышей, попадающих к стенкам колошника, стремительно снижается. Наилучшим является вариант увеличения массы подачи до 70 т при содержании окатышей в шихте 50 %. В этом случае доля окатышей на периферии составляет менее 1 % и негативное влияние данного фактора будет ничтожным. Однако объем порции ограничен вместимостью бункера БЗУ и скипов. Предельный объем заполнения бункера БЗУ железорудной частью шихты для ДП № 5, при среднем угле естественного откоса 35° и с учетом минимального расстояния между вершиной конуса насыпи и горловиной бункера (в нижнем скосе) 0,5 м, по выполненным расчетам составляет $34,464 \text{ м}^3$. Тогда при средней насыпной массе железорудной части шихты $1,9 \text{ т/м}^3$ максимальная вместимость бункера составит $\sim 65,5 \text{ т}$. Геометрический объем скипов составляет 17 м^3 . Общая масса железорудного материала, перевозимого двумя скипами, не может превысить 64 т. Но даже увеличение массы подачи на 10 т снижает долю окатышей на периферии примерно на 5 %, т.е. почти в два раза. Таким образом, для снижения количества окатышей у стен колошника необходимо обеспечить максимально полную загрузку скипов.

Снижение доли окатышей в шихте, естественно, снижает и степень попадания окатышей к периферии (рис. 3).

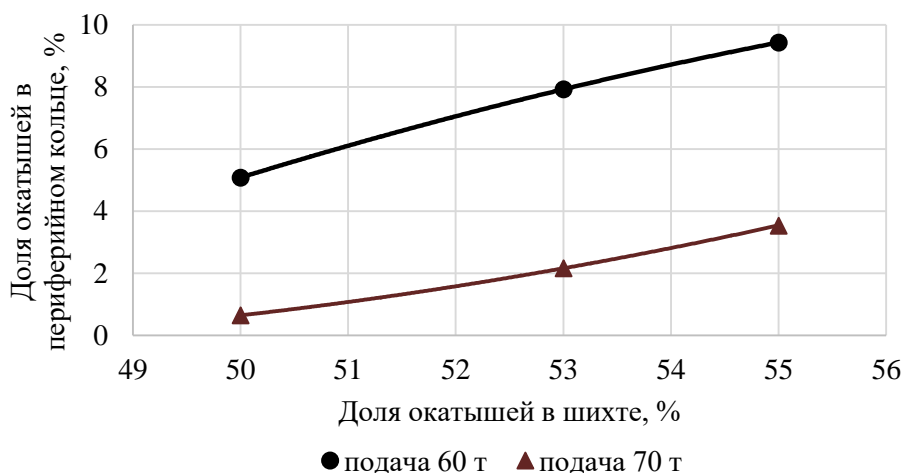


Рисунок 3. Влияние доли окатышей в шихте на долю окатышей в периферийной зоне при различной массе подачи

При реальной массе железорудной части подачи 60–65 т, снижение содержания окатышей в шихте на 5 % существенно сокращает долю окатышей в периферийной зоне – примерно на 4,0–4,5 %. Снижению содержания окатышей в шихте способствовало изменение основности железозофлюса и увеличение расхода доменного присада. К настоящему времени основность железозофлюса уравнивали с основностью качканарского агломерата ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 2,3 \div 2,4$). Поэтому дальнейшее снижение содержания окатышей в шихте возможно либо за счет снижения основности агломератов, либо за счет еще большего расхода доменного присада. Выполненными расчетами установлено, что увеличение в шихте доменного присада на 1 % снижает долю окатышей в ней на 0,35 %. Установление оптимального расхода доменного присада требует проведения отдельных исследований. Снижение основности качканарского агломерата и, соответственно, железозофлюса на 0,1 (например, с 2,35 до 2,25) позволяет снизить долю окатышей в шихте почти на 1,5 %. Совместная реализация этих мероприятий может приблизить содержание окатышей в шихте к уровню 45 %, что обеспечит нормальное функционирование периферийной зоны и повысит эффективность доменной плавки в целом.

На долю окатышей в периферийной зоне должно влиять, казалось бы, распределение материалов по радиусу колошника. Однако, как показали расчеты, степень этого влияния малозначимое. Данное обстоятельство связано с тем, что при сокращении доли выгрузки материалов на периферийное кольцо, объем эллипсоида выпуска (из бункера БЗУ) уменьшается как за счет вертикальных, так и за счет горизонтальных размеров. Действительно, объем вытянутого эллипсоида вращения определяется по формуле:

$$V_3 = 4/3\pi \cdot a \cdot b^2, \quad (1)$$

где a – длина вертикальной полуоси,
 b – длина горизонтальной полуоси.

Как видно из формулы (1), снижение объема выгрузки на периферийное кольцо при условии его замыкания происходит в большей степени за счет уменьшения горизонтальных размеров. На рис. 4, для наглядности, показано незначительное изменение доли окатышей в периферийной зоне при изменении относительного объема выгрузки шихты к стенке колошника от 6 до 12 %.

Зависимости, представленные на рис. 4, имеют полиномиальную закономерность со степенью 3, поскольку расчеты базируются на формуле (1). Следует отметить, что, несмотря на общее малозначимое влияние, для каждого конкретного случая (т.е. в зависимости от массы подачи и содержания окатышей в шихте) имеется свое оптимальное значение объема выгрузки к стенке колошника. Для существующих условий оптимальным будет объем выгрузки на крайнее периферийное кольцо 9–11 % от общего объема порции. Необходимо также иметь в виду, что объем выгрузки к стенке колошника менее 8 % не обеспечивает блокирования поступления окатышей к футеровке из следующего смежного кольца из-за снижения толщины и уровня периферийной зоны.

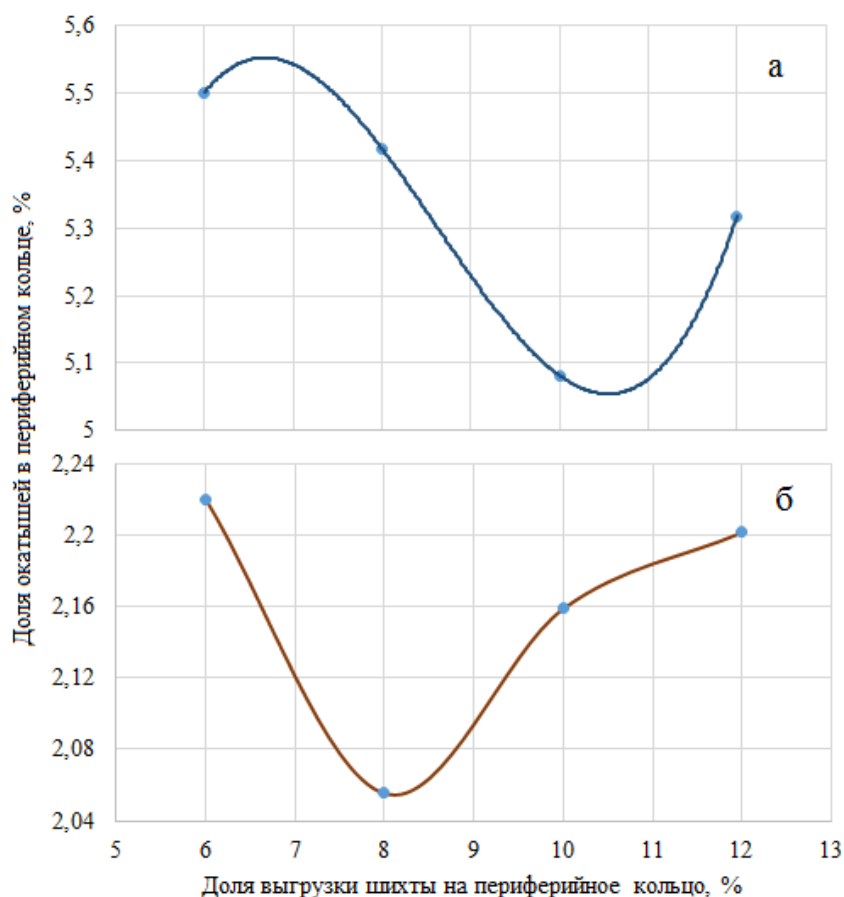


Рисунок 4. Изменение доли окатышей в периферийной зоне при изменении относительного объема выгрузки к стенке колошника (а – масса подачи 60 т, доля окатышей в шихте 50 %; б – масса подачи 70 т, доля окатышей в шихте 53 %)

В целом, по результатам выполненных исследований и расчетов установлено, что существенное влияние на эффективность работы периферийной зоны оказывает общая масса железорудной части подачи и содержание окатышей в шихте. Распределение материалов по радиусу колошника имеет незначительное влияние. Полученные выводы подчеркивают дополнительную целесообразность максимально полной загрузки скипов. Для дальнейшего снижения доли окатышей в периферийной зоне необходимо более детально проработать мероприятия по снижению основности агломератов и увеличения расхода доменного присада.

Библиографический список

1. Металлургия чугуна : учебник для вузов / под ред. Ю. С. Юсфина. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М. : ИКЦ Академкнига, 2004. – 774 с.
2. Большаков, В. И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. / В. И. Большаков. – Киев : Наукова думка, 2007. – 410 с.
3. Большаков, В. И. Оценка эффективности применения загрузочных устройств на доменных печах / В.И.Большаков, И.Г. Товаровский, Ф.М. Шутылев // Сталь. –2005. –№ 7. –С. 17–20.
4. Большаков, В. И. Особенности применения различных загрузочных устройств на современных доменных печах /В.И.Большаков, И.Г.Товаровский, Ф.М.Шутылев // Черная металлургия :Бюл. ин-та «Черметинформация». –2007. –№ 9. – С. 24 – 32.
5. Huatao, Z. Uneven distribution of burden materials at blast furnace top in bell-less top with parallel bunkers / Z. Huatao, Z. Minghua, D. Ping et al. // ISIJ International. – 2012. – V. 52. Is. 12. – P. 2177–2185.
6. Pykhteeva, K.B. Stabilizing the composition of blast-furnace products from titanomagnetites with a nonconical loading trough / K.B. Pykhteeva, S.A. Zagaynov, V.V. Filippov et al. // Steel in Translation. – 2009. – Т. 39. № 1. – P. 45–49.
7. Kushnarev, A. V. System improvement of vanadium hot metal process at EV-RAZ NTMK / A.V. Kushnarev, V.V. Filippov, V.A. Mikhalev, B.S. Tleugabulov // CIS Iron and Steel Review. – 2017. –V.13. – P. 13–17.
8. Филиппов, В.В. Развитие теории и технологии выплавки ванадиевого чугуна с применением пылеугольного топлива / В.В.Филиппов, В.А.Михалев, К.В.Миронов и др. //Черная металлургия :Бюл. ин-та «Черметинформация». –2017. –№ 4. –С. 22 – 25.
9. Jimoh,S.O.Analysis of the characteristics of the blast Furnace peripheral zone /S.O. Jimoh, С.В. Pyhteeva, S.A. Zagaynov // International Journal of Scientific & Technology research. – 2013. – vol.2, Issue 9. – P. 125-128.
10. Пыхтеева, К.Б. Анализ особенностей формирования порций и истечения материалов из бункера БЗУ при загрузке шихты / К.Б.Пыхтеева, С.А.Загайнов, В.В.Филиппов и др. // Сталь.–2008. – № 6. –С. 14–19.
11. Пыхтеева, К.Б. Оптимизация загрузки многокомпонентной шихты с использованием БЗУ / К.Б. Пыхтеева, С.А. Загайнов, С.В. Филатов и др. // Труды Международного конгресса доменщиков «Доменное производство – XXI век». – М. : ООО «Издательский дом «Кодекс», 2010. С. 103-105.

Анализ влияния режима предварительной штамповки на формоизменение и энергосиловые параметры чистовой штамповки цельнокатанных колес с помощью компьютерного моделирования в программном комплексе Deform 3d

Ильиных Р. А.

АО «ЕВРАЗ НТМК», г. Нижний Тагил

Богатов А. А., д-р техн. наук, проф.

УрФУ, г. Екатеринбург

С целью анализа влияния режима предварительной штамповки на формоизменение и энергосиловые параметры чистовой штамповки цельнокатанных колес, а также получения рекомендаций по дальнейшему совершенствованию калибровки для обеспечения осевой симметрии (точности) чернового колеса с целью уменьшения припусков на полнопрофильную механическую обработку, повышения надежности процесса механической обработки чернового колеса и чистоты поверхности, а также уменьшения затрат на полнопрофильную механическую обработку проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе Deform 3D. По результатам моделирования определена калибровка с наилучшими показателями по силовым параметрам и формоизменению, сформулировано требование для дальнейшего совершенствования калибровки при производстве цельнокатанных колес в условиях колесобандажного цеха Нижнетагильского металлургического комбината.

Ключевые слова: штамповка, калибровка, компьютерное моделирование, цельнокатаное колесо, колесопрокатный стан.

С целью повышения стабильности технологического процесса производства на колесопрокатном стане, снижения массы штучной заготовки под прокат, а также оптимального распределения усилий по прессам на АО «ЕВРАЗ НТМК» составлена программа опытно-промышленных работ.

В соответствии с данной программой были сформированы и прокатаны три партии заготовок: сравнительная партия для производства цельнокатанных колес по существующей технологии; первая опытная партия с предварительной штамповкой в соответствии с рисунком 1,б; вторая опытная партия с предварительной штамповкой на штампах с размерами, откорректированными по результатам опытно-промышленной проверки качества колес первой партии (рис. 1, в).

Анализ полученных результатов энергосиловых параметров и формоизменения показал, что наиболее энергоэффективной с точки зрения распределения усилий по прессам (табл. 1), а также заполнения гравюры штампов является калибровка второй опытной партии заготовок.

С целью анализа влияния режима предварительной штамповки на формоизменение и энергосиловые параметры чистовой штамповки цельнокатанных колес, а также получения рекомендаций по дальнейшему совершенствованию калибровки для обеспечения осевой симметрии (точности) чернового колеса с целью уменьшения припусков на полнопрофильную механическую обработку, повышения надежности процесса механической обработки чернового колеса и чистоты поверхности, а также

уменьшения затрат на полнопрофильную механическую обработку проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе Deform 3D.

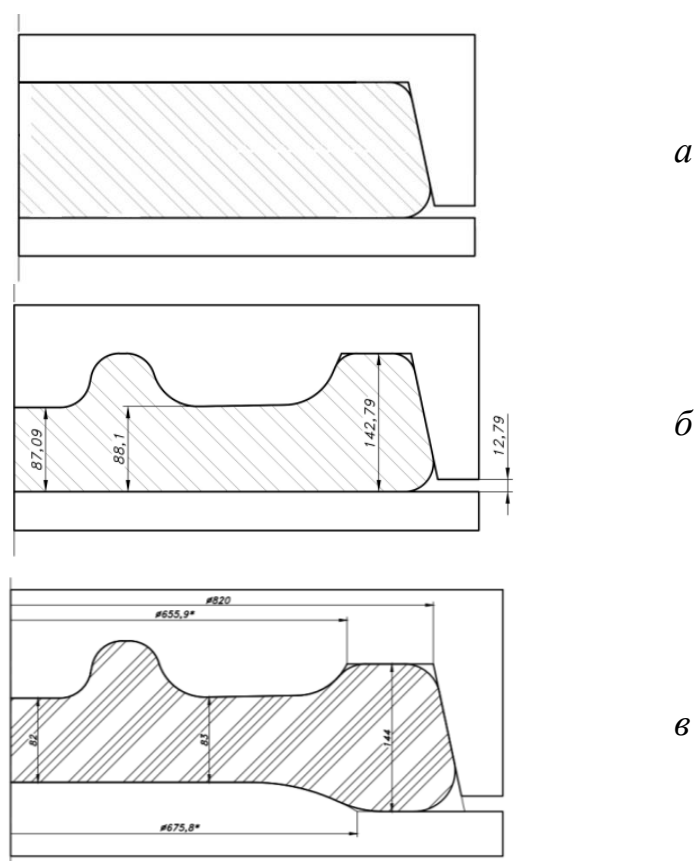


Рисунок 1 – Форма и размеры поковок после предварительной штамповки по трем вариантам: *а* – сравнительная партия (существующая технология), *б* – первая опытная партия, *в* – вторая опытная партия

Таблица 1

Усилия прессования по прессам в зависимости от калибровки пресса R5000

Наименование пресса	Усилия прессования по прессам, тс		
	Сравнительная партия	Первая опытная партия	Вторая опытная партия
R5000	4520	3915	4017
R9000	8156	7118	5835

Для обеспечения сходимости результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных начальные и граничные условия задавались максимально приближенными к реальным, при этом расчет учитывает не только штамповочную операцию, но и теплообмен между нагретой заготовкой и инструментом деформации, а также с окружающей средой. Масса, отклонение формы заготовки для всех исследуемых случаев были приняты в соответствии с протоколом проверки и замера геометрии на заготовительном участке. По результатам моделирования установлены стадии формоизменения для сравнительной и опытных партий.

Начальная стадия осадки заготовки в случае сравнительной партии характеризуется осесимметричной деформацией без исправления геометрических нарушений очага деформации. Эта стадия продолжается до момента одностороннего контакта поковки с калибровочным кольцом, в результате которого оно перемещается до соосного положения с заготовкой. На второй стадии происходит формирование боковой поверхности поковки с односторонним течением металла, а на третьей – уменьшение недоштамповки до минимума, а деформация является осесимметричной.

Для опытных партий на первой стадии при осадке на верхнем торце поковки формируется выступ в виде полутора, ось которого совпадает с осью верхнего штампа и калибровочного кольца прессы R5000. Кроме того, на первой стадии осуществляется разгонка металла и формируется обод черновой поковки увеличенной массы. Вторая стадия предварительной штамповки начинается с момента соприкосновения боковой поверхности поковки с калибровочным кольцом и характеризуется односторонним течением металла до момента завершения формовки поковки в калибровочном кольце таким образом, что ширина контакта кольца с поковкой становится одинаковой по периметру поковки. С этого момента начинается третья стадия штамповки с характерной осесимметричной деформацией, сопровождаемой уменьшением высоты поковки и увеличением ширины контакта ее с калибровочным кольцом. В результате образуется осесимметричная черновая поковка, которую передают роботом-манипулятором на пресс R9000. Черновая поковка на нижнем штампе центрируется после кантовки поковки на 180° с помощью осесимметричного выступа на торцевой поверхности поковки в виде полутора.

Из всех рассмотренных вариантов формы и размеров черновой поковки вариант второй опытной партии показал наилучшие показатели по силовым параметрам и формоизменению заготовки при окончательной штамповке.

На рис. 2 представлены результаты моделирования второй опытной партии заготовок. В табл. 2 представлены технологические параметры штамповки, полученные моделированием в среде Deform 3D.

Сравнение технологических параметров штамповки и формоизменения, полученных при компьютерном моделировании и промышленной апробации показало сходимость результатов в пределах 2 %, что свидетельствует о достаточно точной постановке начальных и граничных условий. На рисунке 3 представлена форма заготовки первой опытной партии после штамповки на прессе R5000 с указанием основных размеров и контакта с инструментом деформации.

Анализ методом конечных элементов в программном комплексе Deform 3D, а также сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных данных показал, что определяющее влияние на точность черновых колес оказывают операции предварительной и окончательной штамповки заготовки на прессах R5000 и R9000. Можно предпо-

ложить о существовании рациональной формы и размеров черновой поковки, полученной на прессе R5000, которая обеспечит высокую точность черновых колес и уменьшение технологических припусков на механическую обработку.

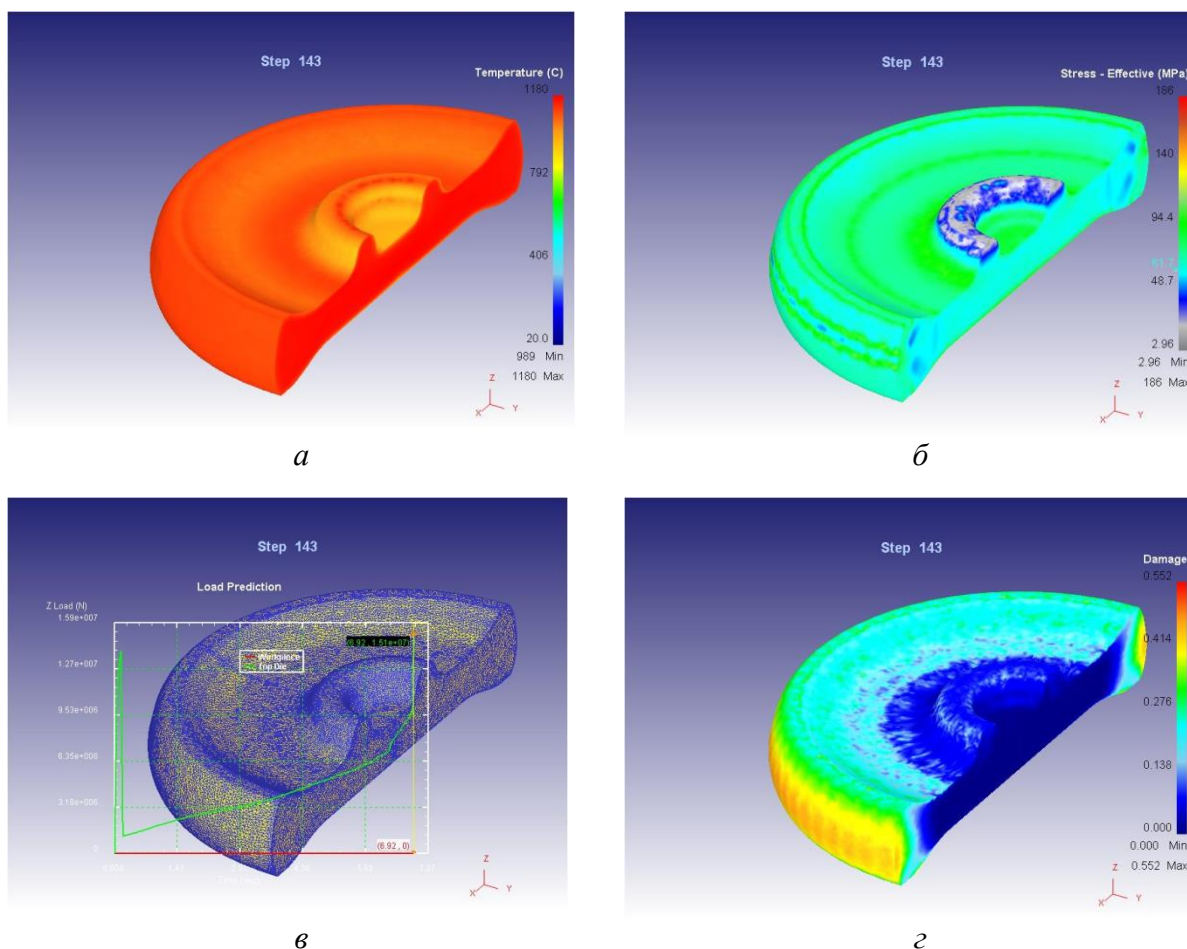
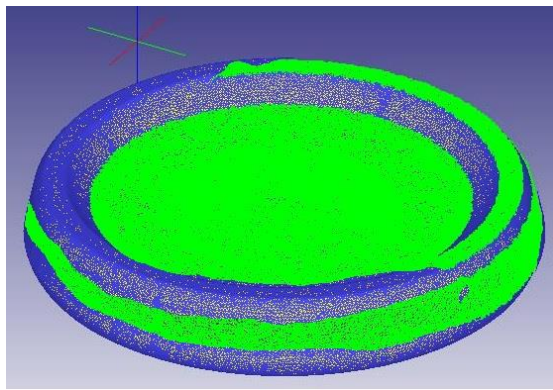


Рисунок 2 – Результаты моделирования второй опытной партии заготовок: *а*– распределение температуры заготовки, *б* – распределение напряжений в заготовке, *в* – изменение усилия штамповки в процессе формоизменения, *г* – накопленная деформация

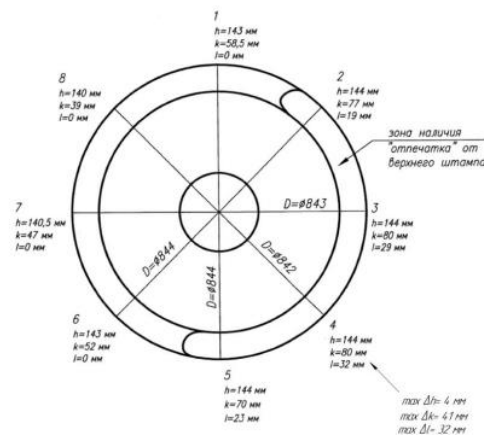
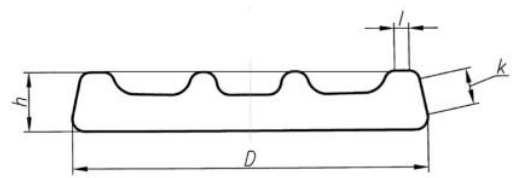
Таблица 2

Технологические параметры штамповки, полученные моделированием в среде Deform 3D

Партия заготовок	Пресс	Усилие прессования, т.с.	σ_{MAX} , МПа	Заполнение элементов колеса			
				Обод по высоте	Ступица по высоте	Гребень	Контакт с кольцом
Сравнительная партия	R5000	4600	99,9	-	-	-	Да
	R9000	8020	219	Частично	Да	Да	Да
Первая опытная партия	R5000	3854	183	Частично	Да	-	Да
	R9000	7227	145	Нет	Да	Частично	Да
Вторая опытная партия	R5000	4120	186	Да	Да	-	Да
	R9000	5710	139	Да	Да	Да	Да



a



б

Рисунок 3 – Формоизменение заготовки на прессе R5000 первой опытной партии:

a – форма заготовки и пятно контакта с инструментом деформации в программном комплексе Deform 3D, *б* – форма заготовки, полученная в результате промышленной апробации

С целью дальнейшего совершенствования калибровки было сформулировано следующее требование к процессу – необходимость калибровки поковки, обеспечивая ее осевую симметрию, и повышение точности размеров черновой поковки. Успешное решение поставленной задачи позволит уменьшить массу заготовки, повысить точность чернового колеса, уменьшить припуски на полнопрофильную механическую обработку, повысить надежность процесса механической обработки чернового колеса и чистоту поверхности, а также уменьшить затраты на полнопрофильную механическую обработку.

Исследование упрочнения карбидоборидом алюминиевого сплава АЛ-9 электроискровым и лазерным способами

Казин А. А.
Белозеров Л. С.
Плещев В. П.

Купцов С. Г., канд. техн. наук, доц.
Магомедова Р. С., канд. техн. наук, доц.
УрФУ, г. Екатеринбург

В статье рассмотрено влияние параметров электроискрового легирования карбидоборидом титана и последующей лазерной обработке на технологические свойства нанесенного электроискрового покрытия. В качестве испытуемого образца использовали алюминиевый сплав АЛ-9. Была проведена электроискровая обработка и выполнено

исследование физико-механических свойств нанесенного покрытия из карбидорида титана (прирост массы, шероховатость, толщина, сопротивление абразивному износу). Для улучшения качества покрытия, проведена обработка полученного электроискрового покрытия лазером с повторным исследованием физико-механических свойств гибридного электроискрового лазерного покрытия. После проведенных испытаний по нанесению покрытия, сделана металлография образцов, а также проведены испытания на твердость.

Ключевые слова: электроискровое легирование; покрытие; упрочнение; лазерная обработка; карбидоборид; износостойкость.

Способ электроискрового легирования (ЭИЛ) позволяет получать покрытия на металлических поверхностях различными токопроводящими материалами. Метод прост в техническом исполнении, обладает низкой энергоемкостью, имеет возможность локального нанесения покрытий из любых токопроводящих материалов [2, с. 51–54]. Метод электроэрозионной обработки заключается в том, что в процессе происходит полная эрозионная ЭИ (электроискровая обработка) поверхностей двух электродов, один из которых является обрабатываемой деталью, а другой – электродом-инструментом. Под воздействием высоких температур в зоне разряда происходит нагрев, расплавление и частичное испарение металла электрода, а на обрабатываемой поверхности формируется измененный поверхностный слой, т.е. происходит перенос материала анода на катод. В результате перечисленных выше процессов при ЭИЛ происходит повышение твердости, прочности, износостойкости упрочняемого изделия. Метод не требует специальной подготовки обрабатываемых поверхностей, позволяет производить обработку материала различных размеров и конфигураций, изготовленных из различных сталей, отличается простотой применяемого оборудования и достаточно высокой производительностью [3, с. 56–66].

В данной работе в качестве экспериментальных образцов использованы пластины из алюминия АЛ-9 и контрольный образец (К) из такого же сплава, в качестве электродов для ЭИЛ использован электрод из карбидоборида титана, полученный в работах Сумина В.И. методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1]. Химические составы исходных шихт, продуктов и фазовый состав электродов для ЭИЛ приведен в табл. 1 [1]. На поверхность образца наносится покрытие из материала карбидоборид, методом ЭИЛ на установке Элитрон – 52А». Режимы ЭИ нанесения приведены в табл. 2. Свойства полученных покрытий приведены в табл. 3, табл. 4. Обработанные ЭИ поверхности испытывали на сопротивление износу по методу Хаворда-Бринелля. На свободном абразиве (речной песок). Результаты испытаний приведены в табл. 5. Наиболее высокой износостойкостью обладают образцы 2А и 3А.

На образцы поочередно наносилось ЭИ покрытие различными режимами материалом карбидоборид, потом следовала обработка лазером, режим тт-6, напряжение $U=320\text{В}$, утяжка=8, длительность импульса – 7 мс.

Таблица 1

Фазовый состав электродов для электроискрового легирования

№ п/п	Фазовый состав
1	TiB ₂ ; TiC; B ₄ C
2	TiB ₂ ; TiC;
3	TiB ₂ ; TiC;
4	TiB ₂ ; TiC;
5	TiB ₂ ; TiC;
6	TiB ₂ ; TiC; TiB
7	TiC; TiB
8	TiC; TiB

Таблица 2

Режимы нанесения электроискрового покрытия

Образец	Режим ЭИО	Емкость, мкФ	Рабочий ток, А
1А	RC-1	480	10-15
2А	RC-2	480	20-30
3А	RC-3	480	60-80
4А	ТТ-9	320	3,1

Таблица 3

Свойства полученных покрытий после электроискровой обработки

Режим нанесения покрытия	RC-1	RC-2	RC-3	ТТ9
Масса после нанесения покрытия, г	22,5848	23,9544	23,496	23,5634
Прибыль массы, г	+0,0128	+0,0204	+0,033	+0,031
Толщина после нанесения покрытия, мм	5,846	6,42	6,486	5,998
Прибыль толщины, мм	+0,134	+0,2	+0,366	+0,052
Шероховатость	0,054	0,068	0,073	0,069

Таблица 4

Шероховатости поверхностей

Номер образца	1А	2А	3А	4А	К
Начальная шероховатость образцов	0,028	0,035	0,041	0,031	0,036
Шероховатость после ЭИЛ	0,054	0,068	0,073	0,069	-
Шероховатость после лазерной обработки	0,041	0,059	0,061	0,048	-

На графике 1 представлено изменение массы Δm от времени. Износостойчивость характеризуется скоростью износа (тангенсом наклона, который принят за критерий сопротивления износостойчивости). Коэффициенты износа после ЭИ обработки в начальный период и в установившемся режиме приведены в табл. 5.

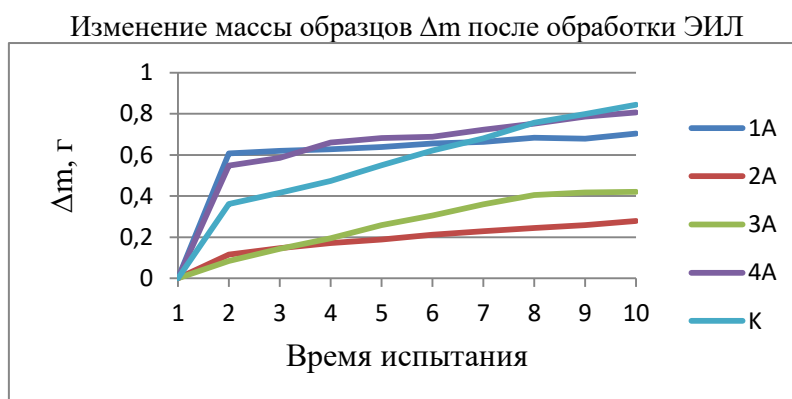
Очевидно, что во всех случаях износостойчивость упрочненной поверхности намного выше, чем поверхность контрольного образца от 2 до 5 раз.

Таблица 5

Коэффициенты износа после электроискровой обработки

Номер образца	$K_{\text{износа}}(tga)$ в начальный период	$K_{\text{износа}}(tga')$ при установившемся режиме
1А	0,3	0,0125
2А	0,06	0,0237
3А	0,042	0,041
4А	0,284	0,0325
К	0,185	0,06

График 1



Проведенные лабораторные и промышленные испытания показали, что режимы RC-2 и RC-3 наиболее эффективные для повышения износоустойчивости при трении. Обработка образцов проводилась лазерным оборудованием системы «НТФ100». Такая обработка не воздействует на образцы. Деформации находятся на минимальном уровне. Высокая точность позволяет максимально качественно обработать поверхность образцов, получить более гладкую и ровную поверхность после покрытия, практически не теряя массу. Результаты испытаний на износостойкость приведены в табл. 6, и на графике 2.

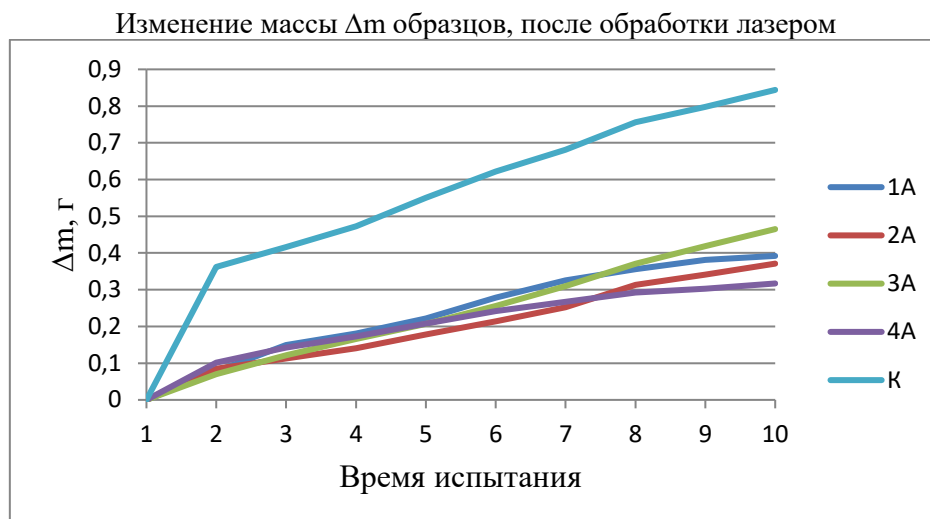
Таблица 6

Коэффициенты износа после лазерной обработки

Номер образца	$K_{\text{износа}}(tga)$ в начальный период	$K_{\text{износа}}(tga')$ при установившемся режиме
1А	0,075	0,0342
2А	0,04	0,036
3А	0,03	0,05
4А	0,05	0,0275
К	0,185	0,06

Очевидно, что во всех случаях износоустойчивость упрочненной поверхности намного выше, чем поверхность контрольного образца от 2 до 5 раз.

График 2



При лазерной обработке происходит высокая концентрация подводимой энергии, что позволяет производить обработку только поверхности участка материала без нагрева остального объема и нарушения структуры и свойств. Обработка лазером обеспечивает равномерное распределение нанесенного покрытия на поверхность образца, и создает прочное сцепление с основным металлом.

Измерения микротвердости образцов после ЭИЛ и лазерной обработки представлены в табл. 7.

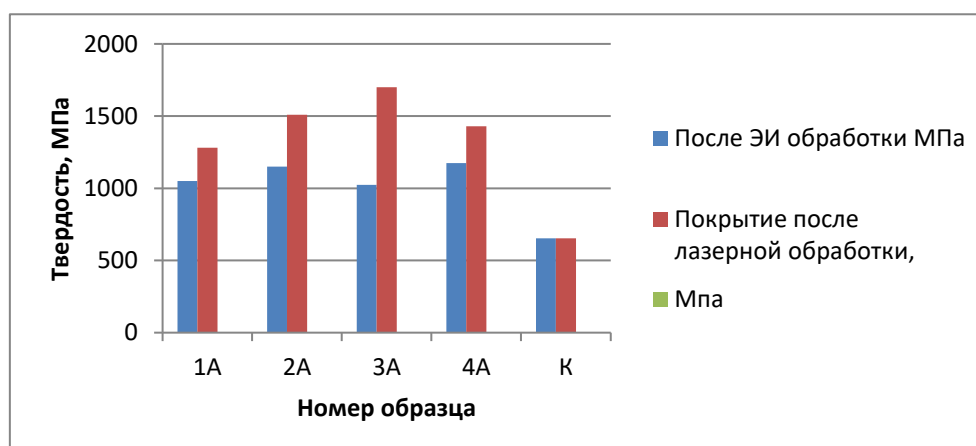
Таблица 7

Измерения микротвердости

Образцы	1A	2A	3A	4A	K
После ЭИ обработки МПа	1050	1150	1024	1174	654
Покрытие после лазерной обработки, Мпа	1280	1510	1700	1430	654

График 3

Микротвердость образцов



Были проведены металлографические исследования. На каждый образец наносилось ЭИ покрытие карбидоборидом, а так же поверхность подвергалась обработке лазером. На рисунках показаны образцы после ЭИ

легирования, и после лазерной обработки при 100-кратном увеличении. Металлографические исследования показали, что после ЭИ обработки покрытие имеет достаточно высокую шероховатость, трещины и поры. Лазерная обработка улучшает качество покрытия, уменьшает количество пор и трещин.

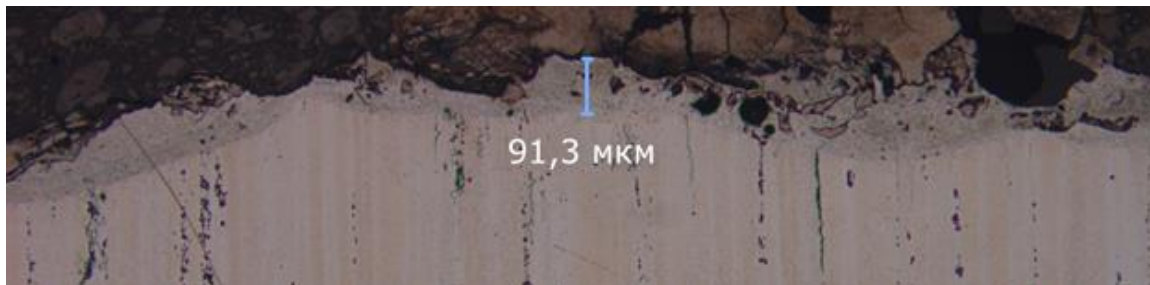


Рисунок 1. Электроискровое покрытие, образец 1А



Рисунок 2. Покрытие после лазерной обработки, образец 1А

Обсуждение экспериментальных результатов:

Как следует из вышеприведенных экспериментальных результатов, наилучшую износоустойчивость после ЭИ легирования показали образцы 2А и 3А, после лазерной обработки образцы 1А, 2А и 4А. Это объясняется следующим:

1. Шероховатость значительно снижается, следовательно, износ за счет трения уменьшается.
2. Микротвердость покрытий существенно превосходит микротвердость контрольного образца.
3. Лазерная обработка ЭИ покрытия положительно влияет на несплошность электроискрового покрытия, как бы разглаживая его неровности и выпуклости, равномерно по поверхности основы, что приводит в целом к улучшению качества покрытия – снижению шероховатости, увеличение твердости и износостойкости.

Вывод:

1. Проведена гибридная искровая лазерная обработка алюминиевых образцов. Данная обработка значительно увеличивает износоустойчивость образцов. Лазерная обработка значительно уменьша-

ет шероховатость искровой обработки, что является удовлетворительным результатом.

2. Определены оптимальные параметры нанесения ЭИ и лазерного покрытия.

Износостойкость упрочненных пластин намного превысила износостойкость неупрочненных.

Библиографический список

1. Сумин В.И. «Самораспространяющийся высокотемпературный синтез карбидборидов титана, разработка и применение износостойких композиционных сплавов на их основе». 1978г.

2. Верхотуров А.Д., Драчинский А.С., Подчерняева И.А. и др. «О физической природе эрозии и формирования поверхностного слоя приэлектроискровом легировании молибдена пористыми электродами железа.// Порошковая металлургия». 1983. – №12. – С. 51–54.

3. Лазаренко Н.И. «Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами». Электроискровая обработка металлов. М.: Изд-во АН СССР. 1960. Вып. 2. – С.56–66.

4. Лазаренко Н.И. «Электроискровое легирование металлических поверхностей». М.: Машиностроение. 1976. – С. 44.

5. Лазаренко Н.И. «Изменение исходных свойств поверхностей катода под действием искровых электрических импульсов, протекающих в газовой среде». В сб. Электроискровая обработка металлов. Вып.1. Изд-во АН СССР. М., 1957. – С. 70–94.

Новая концепция развития технологии переработки продуктов коксования на Коксохимическом предприятии АО «ЕВРАЗ НТМК»

Козырь А. Н.

Коксохимическое предприятие АО «ЕВРАЗ НТМК», г. Нижний Тагил

В работе рассмотрены основные альтернативные виды продуктов из каменноугольной смолы пековому коксу (как невостребованному на рынке, процесс производства которого имеет негативные воздействия на экологию). Такие как изотропный кокс (прокаленный инепрокаленный, сырье для конструкционных графитов), высокотемпературный пек, мезофазные порошки (как сырье получения сверхпрочных, высокоплотных графитов), игольчатый кокс (сырье для графитированных электродов), мезофазные пеки, качественные пропиточные пеки и пеки-связующие. Выбор сделан в пользу игольчатого кокса, как наиболее дорогого и востребованного на рынке продукта. Показаны основные технические и качественные характеристики игольчатого кокса. Приведен анализ мирового рынка игольчатого кокса и графитированных электродов, доказана необходимость создания собственного производства игольчатого кокса в России. Даны сведения об основных мировых производителях игольчатого кокса и типах выпускаемого кокса. Представлена схема получения игольчатого кокса на примере производства компании Sinosteel Corporation (Китай). Процесс состоит из трех основных стадий: предварительная подготовка сырья, замедленное коксование и прокаливание готовой продукции. Приведены основные качественные характеристики получаемого кокса, материальный баланс, экономический эффект. Доказана экономическая целесообразность проекта.

Ключевые слова: каменноугольная смола, игольчатый кокс, пек, производство.

Коксохимическое предприятие г. Нижнего Тагила АО «ЕВРАЗ НТМК» выпускает металлургический кокс для доменного производства. Одним из побочных продуктов производства является каменноугольная смола, из которой получают ряд ценных продуктов и полупродуктов, в частности каменноугольный пек.

Каменноугольный пек подвергают окислению и высокотемпературному пиролизу с получением пекового кокса. Данный вид кокса является компонентом для производства анодной массы, графитированных электродов, различных углеродистых конструкционных материалов, выпускаемых предприятиями цветной металлургии (электродными и алюминиевыми заводами).

Однако пековый кокс становится невостребованным, и в ближайшем будущем основные потребители будут отказываться от этого продукта, в пользу более качественных и ценных, таких как, например, изотропный кокс. Также существенным недостатком процесса производства пекового кокса является наличие значительных количеств выбросов вредных веществ в окружающую среду. Данные факторы, а также нынешние требования рынка требуют начать поиск альтернативных, высокомаржинальных решений по переработке каменноугольной смолы (пека).

Из каменноугольной смолы возможно получение следующих, нужных российскому рынку продуктов:

- Качественного изотропного кокса (непрокаленного и прокаленного) для получения конструкционных графитов с конкурентными свойствами.
- Высокотемпературного пека.
- Мезофазных порошков для получения сверхпрочных, высокоплотных графитов, а также для получения анодной массы литий-ионных батарей.
- Игольчатого кокса для производства графитированных электродов, потребность в котором в России полностью удовлетворяется за счет импорта из других стран (США, Япония, Китай и др.).
- Мезофазных пеков для производства углеродного волокна.
- Качественных пропиточных пеков и пеков-связующих для углерод-углеродных композиционных материалов.

Одним из приоритетных решений является получение из каменноугольного пека продукта, с высокой рыночной стоимостью – игольчатого кокса. Данный кокс используется для производства крупногабаритных (диаметром 500 мм и более) высокомошных графитированных электродов марки УНР, для выплавки стали в электросталеплавильных печах. Также широко используется для производства анодов для литий-ионных аккумуляторов с зарядной и разрядной емкостью 360 мА·ч/грамм, эффективность зарядки которых составляет $\geq 95\%$. Игольчатый кокс также может быть использован для производства высокопрочного, высокоплотного и высокоочищенного графита.

Игольчатый кокс характеризуется малым содержанием золы, серы, ярко выраженной анизотропией волокон, низким содержанием гетеропримесей, высокой удельной плотностью, хорошей графитируемостью (рис. 1, 2). Может обеспечить низкий коэффициент термического расширения, высокую электропроводность. Выделяют два вида игольчатых коксов разного качества - «премиум» и «интермидиат». Основными свойствами игольчатого кокса являются плотность, содержание микропримесей, микроструктура кокса, гранулометрический состав. Технические свойства игольчатого кокса во многом определяются коэффициентом термического расширения (КТР), чем ниже величина КТР, тем выше термостойкость кокса, т.е. его способность выдерживать тепловые удары при пиковых нагрузках по электрическому току.

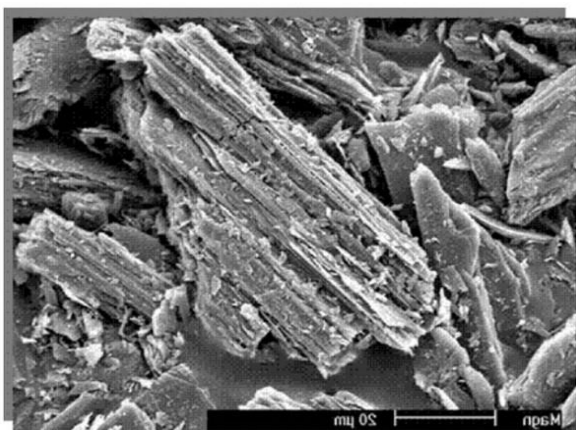


Рисунок 1



Рисунок 2

Мировое производство ИК составляет 880 тыс. тонн в год (за исключением Китая, табл. 1) [1]. Основным потребителем ИК в мире являются производители графитированных электродов.

В России на данный момент нет своего производства игольчатого кокса, однако существует значительный спрос со стороны производителей графитированных электродов (потребность более 100 тыс. тонн в год [2], к примеру, Челябинский завод по выпуску углеграфитовой продукции ОАО «ЭНЕРГОПРОМ-ЧЭЗ»). Поэтому электродной промышленности страны, приходится всецело полагаться на импорт, что может создать, при нынешней сложившейся политической и экономической ситуации, известные трудности в будущем. В связи с этим, решение вопроса об импортозамещении в этой сфере должно стать приоритетным в нашей стране. Стоит отметить, что первым предприятием по выпуску игольчатого в России может стать Омский НПЗ. В данное время на предприятии происходит модернизация установки замедленного коксования с планируемым объемом выпуска 38 тыс. тонн в год.

Анализ текущей ситуации на рынке графитированных электродов показал, что депрессия на рынке в 2016 году и начале 2017 г., связанная с переизбытком предложений, низкой загрузкой мощностей (65-75% в мире,

60% в Китае), определила самый низкий уровень цен на графитированные электроды, за последние 12 лет [3]. Однако ситуация резко изменилась к концу 2017 года. Ужесточение экологического регулирования в Китае, что привело к закрытию ряда мощностей по производству графитированных электродов и игольчатого кокса, и сильный рост производства электростали в мире, привели к резкому росту спотовых цен на графитированные электроды и игольчатый кокс (цена на кокс в 2017 г. выросла более чем на 726% [4]). Также стоит отметить, что согласно ССИА, ожидается к 2020 году спрос на игольчатый кокс только в Китае достигнет 600 000 тонн в год (в 2017 г. потребление было на уровне 300 тыс. тонн в год) [4]. Поэтому данные факты делают еще более привлекательным и выгодным налаживание выпуска игольчатого кокса в России.

Игольчатый кокс может быть изготовлен из нефти (нефтяной игольчатый кокс) или из каменноугольного пека (угольного игольчатого кокса). Сырьем для нефтяного игольчатого кокса являются дистиллятный крекинг-остаток и газойль каталитического крекинга. Для угольного игольчатого кокса это дистилляты каменноугольной смолы или каменноугольный пек. В таблице 1 приведены основные мировые производители игольчатого кокса (по состоянию на 2017 г.) [1].

Таблица 1

Основные производители игольчатого кокса

Компании производители	Мощность (тыс. тонн/год)	Тип кокса	Страна
ConocoPhillips Limited	410	нефтяной кокс	UK, USA
Seadrift Coke L. P.	150	нефтяной кокс	USA
C-Chem Co Ltd.	90	угольный кокс	Japan
Mitsubishi Chem Corp.	70	угольный кокс	Japan
КОА	80	нефтяной кокс	Japan
Petrocoke (JOMO)	80	нефтяной кокс	Japan
Итого	880		

Считается, что игольчатый кокс из каменноугольного сырья по качеству превосходит кокс из нефтяного сырья, причем выход его в расчете на исходное сырье вдвое превышает выход нефтяного кокса. В частности, это связано с малым содержанием серы, золы в каменноугольном сырье, а также высоким содержанием ароматических соединений. Однако, существует необходимость в тщательной подготовке каменноугольного сырья, в связи с наличием соединений нерастворимых в хинолине (α_1 -фракция), которые в свою очередь препятствуют образованию и росту частиц мезофазы и формированию кокса с выраженной игольчатой структурой.

Производство игольчатого кокса (на примере компании Sinosteel-Corporation, Китай) разделяется на три стадии: предварительная подготовка сырья, замедленное коксование и прокаливание.

Сырье для производства игольчатого кокса должно иметь высокое содержание ароматических углеводородов, низкое содержание нераство-

римых в хинолине соединений и низкое содержание гетероциклических соединений с элементами S или N. Каменноугольный пек является углеводородом с высоким содержанием ароматических соединений, но содержание нерастворимых в хинолине соединений довольно высокое (3-6%), поэтому необходимо удалить или уменьшить (не более 1%) их эффективным и экономичным методом.

В промышленности существует много методов для удаления нерастворимых в хинолине соединений, одним из которых является очистка с помощью растворителей и разделение по фракциям: на легкую и тяжелую. Принцип метода состоит в том, что под действием растворителей хинолин нерастворимые частицы подвергаются процессу флокуляции и после статического разделения образуются две фракции.

Легкая фракция, в основном не содержит нерастворимых в хинолине соединений, а тяжелая фракция будет концентрировать практически все нерастворимых в хинолине соединений компоненты. Путем перегонки для удаления и извлечения растворителя получают очищенный (легкий) пек и тяжелый пек. Выход легкого пека, используемого в качестве сырья для производства игольчатого кокса, составляет более 70%.

Американская компания (LummusCo.) применяет метод, в котором каменноугольная смола, разбавленная растворителем, разделяется на фракции с помощью центрифуги. Операция производится при высоких температурах и давлении. Выход светлого пека составляет более 90%. Однако этот метод требует использования сложной конструкции центрифуги, работающей при высоких температурах и давлении, что ограничивает использования этого метода.

Компания Hongde (провинция Shanxi, Китай) для очистки каменноугольной смолы от хинолин нерастворимых включений использует метод «термической полимеризации». В этом случае в качестве сырья используется масло с низкотемпературной точкой кипения, выделяемого из каменноугольной смолы. Это масло также не содержит хинолин нерастворимых включений. Дальнейшая полимеризация, протекающая под воздействием высокой температуры и давления, позволяет получить пек для дальнейшей переработки. Недостатками данного метода являются: низкий выход годной смолы и трудность регулирования хода технологического процесса.

Также стоит отметить метод, основанный на гидрогенизационном облагораживании каменноугольной смолы атомарным водородом или донором-переносчиком водорода (тетралин, метилтетралин) в присутствии нанокатализаторов (на основе Mo, Ni, Fe и др.). В последующем гидрогенизат подвергают фильтрации с выделением катализатора пригодного для повторного применения. В результате получали гидрогенизат (непосредственное сырье для производства игольчатого кокса) с низким содержанием нерастворимых в хинолине соединений [5].

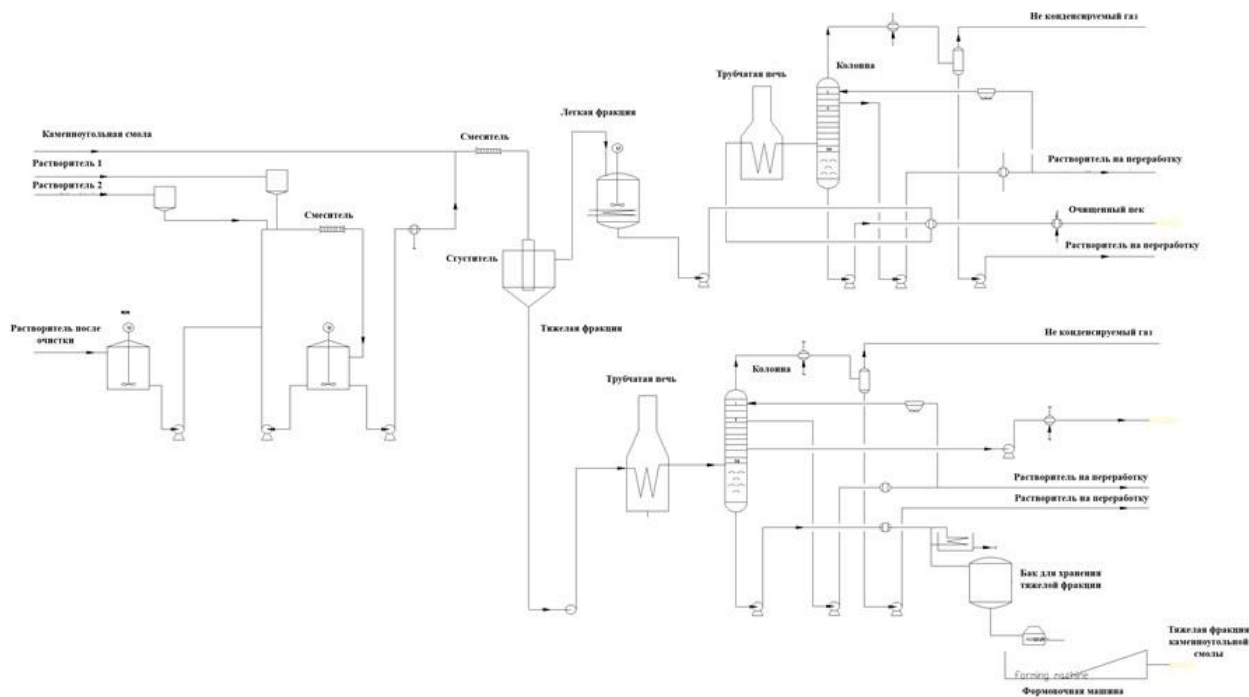


Рисунок 3. Схема участка подготовки сырья

Метод замедленного коксования является основным методом глубокой переработки тяжелых остатков нефти. Установки замедленного коксования требуют низкого уровня инвестиций, имеют быстрый экономический эффект и позволяют решить проблемы с загрязнением окружающей среды.

Процесс замедленного коксования проводится под воздействием высоких температур, высоком коэффициенте рециркуляции и длительной выдержкой во времени.

Коническая конструкция башни замедленного коксования, выполненная из единой поковки, позволяет добиться прочности при воздействии переменных температур, обеспечивая длительный срок службы.

Для продления работы печи коксования применяется высокоскоростное водяное форсуночное охлаждение. Применение горелки с плоским факелом позволяет получить низкое выделение NOx.

Во время продувки башни коксования производится улавливание маслянистых веществ в отходящих из башни газах и обеспечивается герметичность выпуска газов – это позволяет уменьшить загрязнение окружающей среды. Маслянистые вещества отделяются от газа и поступают на переработку.

Трубопровод между верхней частью башни коксования и дистилляционной колонной выполнена с форсуночным охлаждением. Для удаления мелкодисперсного кокса из технологического процесса часть продукта, отбираемого в нижней части колонны, пропускают через фильтр. С помощью этих средств уменьшают коксование в трубах, и достигается более длительный срок эксплуатации.

Для управления установкой замедленного коксования применяется система DCS. На башне коксования установлен измеритель уровня – для контроля высоты кокса и приповерхностного слоя. Гидравлическая система выгрузки кокса управляется контроллером PLC, который имеет систему самотестирования. Контроллер обеспечивает работу взаимных блокировок, что позволяет эффективно и безопасно реализовать работу по выгрузке кокса.

Водяная системы охлаждения оборудования закрытого типа, что уменьшает количественно загрязнение окружающей среды и снижает величину занимаемой площади. Охлаждение воды производится воздушными охладителями.

Удаление кокса во время вторичного осаждения, гидроциклонное разделение, наличие баков хранения и другие технологии и устройства позволяют сэкономить площадь, занимаемую оборудованием, и уменьшают источники выбросов.

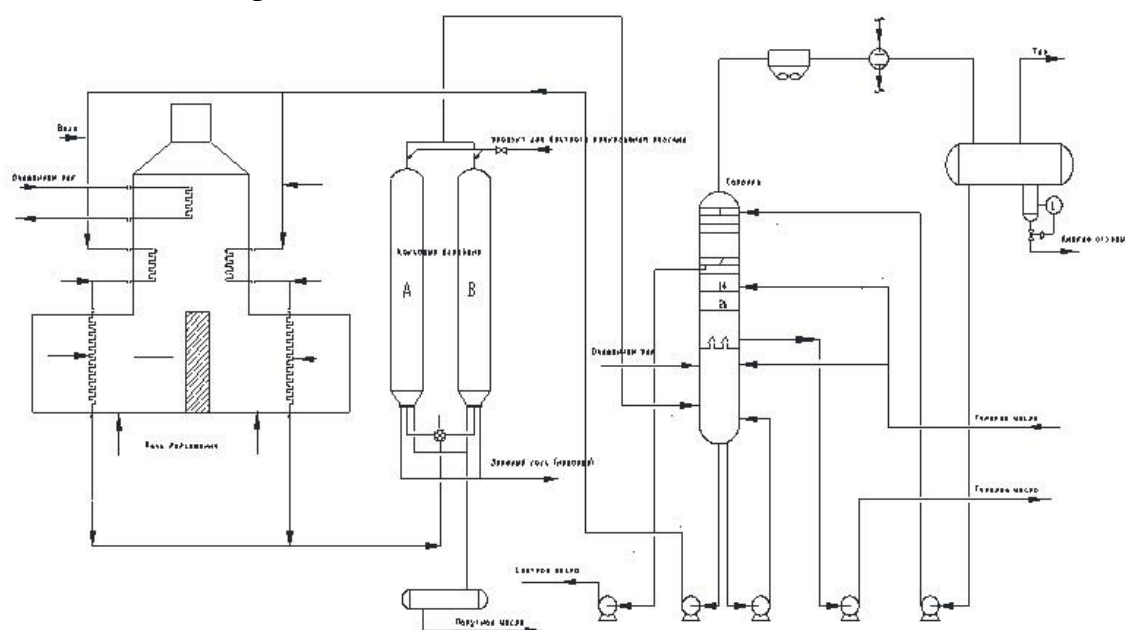


Рисунок 4. Схема участка замедленного коксования

В настоящее время применяются три технологии прокаливания игольчатого кокса: в печах с вращающимся подом; в чашевидных печах и во вращающихся обжиговых печах

Несмотря на то, что в печах с вращающимся подом производительность самая высокая, однако в этих печах происходит измельчение игольчатого кокса. По этой причине печи данного типа не применяются для прокаливания игольчатого кокса.

Чашевидные печи имеют небольшую производительность для процесса прокаливания, поэтому требуется установка большого числа таких печей. Кроме того, в таких печах невозможно получить высокую температуру прокаливания.

Хотя, во вращающихся печах происходит потери игольчатого кокса за счет горения, однако производственный процесс прокаливания в таких печах прост в эксплуатации и легко регулируем. Температура обжига может быть поднята до 1500°C. Регулировкой скорости вращения печи можно регулировать время нахождения материала в печи – для обеспечения высокого качества игольчатого кокса.

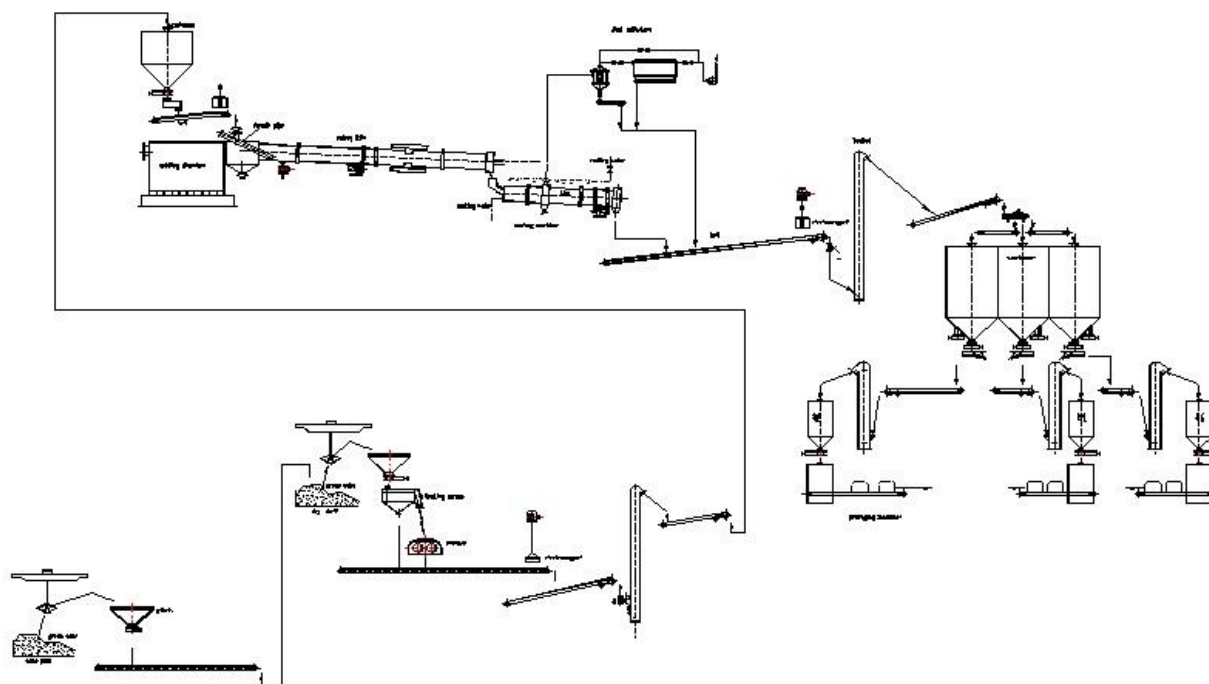


Рисунок 5. Схема участка прокаливания готовой продукции

По данной технологии получается игольчатый кокс следующего качества:

Наименование параметра	Единица размерности	Значение
Действительная плотность	кг/м ³	≥2130
Зола	%	<0,3
Сера	%	<0,5
Азот	%	<0,7
Коэффициент линейного теплового расширения	×10 ⁻⁶ /°C	<1,2

Материальный баланс процесса и получаемые продукты:

Наименование материала	Параметры использования	Количество	Примечание
Загружаемые материалы:			
Каменноугольная смола	≤150°C	15 т/ч (131400 т/год)	
Растворитель 1	≤60°C	1000 т/год	
Растворитель 2	Комнатная температура	1500 т/год	

Выгружаемые материалы:			
Антраценовое масло	200°С	0,75 т/ч (6570 т/год)	для продажи
Тяжелый пек	200°С	3,5 т/ч (30660 т/год)	для продажи
Коксовый газ	0,2 МПа	2000 нм ³ /ч	для обогрева трубчатой печи
Коксовое легкое масло	100°С	15 т/день (5475 т/год)	
Коксовое тяжелое масло	100°С	40 т/день (14600 т/год)	для продажи
Игольчатый кокс		130 т/день (47450 т/год)	для продажи

Таким образом при производстве порядка 47 тыс. тонн в год игольчатого кокса и при средних мировых ценах от 650\$ до 1000\$ за тонну [6], окупаемость проекта, при инвестициях порядка 5 млрд руб., составит около 2 лет. Проект может быть реализован на площадке Коксохимического производства АО «ЕВРАЗ НТМК», однако существует проблема в нехватке сырья. На данный момент на предприятии вырабатывается 90 тыс. тонн каменноугольной смолы в год, что мало для экономической привлекательности проекта, поэтому дополнительное количество смолы необходимо покупать у сторонних предприятий (приблизительно 50 тыс. тонн в год) или рассмотреть возможность получения каменноугольного пека непосредственно из каменных углей (термическая переработка углей; термохимическая переработка углей в среде растворителей в жидкие продукты, включая пеки) [7].

Поэтому данное предложение является для ООО «ЕвразХолдинг» экономически выгодным и целесообразным, в том числе из-за возможных инвестиций со стороны государства.

Библиографический список

1. Хайрудинов И. Р. Перспектива расширения сырьевой базы для получения игольчатого кокса/Башкирский химический журнал. 2011. Т. 18. № 3.
2. Валявин Г.Г. Процесс замедленного коксования и производство нефтяных коксов специализированных по применению/ журнал «Территория Нефтегаз. 2011 № 8.
3. Анализ текущей ситуации на рынке графитированных электродов. Рабочая группа при экспертном совете ФАС по развитию конкуренции в сфере металлургии. 31 августа 2017.
4. MetallPlace.ru. Китайский Baosteel рассчитывает увеличить выпуск игольчатого кокса на 20% в 2018 году. Ссылка: http://metallplace.ru/news090118_6/.
5. Бейлина Н.Ю. Новая концепция переработки коксохимической смолы/ Химия твердого топлива. 2006 № 5.
6. gazprom-neft.ru. Коксозамещение. Омский НПЗ осваивает производство игольчатого кокса. Ссылка: <http://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2015-september/1109446/>.
7. Кузнецов П.Н. Методы получения угольных пеков/Химия твердого топлива. 2015 № 4.

Технологические особенности сушки каменного угля марки Д

Матюхин В. И., канд. техн. наук, доц.

Ямшанова Н. В.

Матюхина А. В., канд. техн. наук, доц.

УрФУ, г. Екатеринбург

Мейстер Т. А.

ООО «АСК Буровое машиностроение», г. Екатеринбург

Одним из средств улучшения энергетической ценности твердого топлива является изменение содержания в нем избыточной влаги.

При исследовании закономерностей развития тепломассообменных процессов при нагреве пробы угля со скоростью 5 град/мин. в атмосфере воздуха с получением полной кривой дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при скоростях нагрева 5 °С/мин. установлено, что первоначальный нагрев пробы угля сопровождается удалением физической влаги до температуры 180 °С и повышением ее теплосодержания (1 период) При температуре около 340°С начинают развиваться процессы активизации процессов окисления углерода с выделением избыточного тепла (2 период), интенсивность которых заметно по изменению массы образца уже при 460°С и продолжается до 676 °С. Третий период нагрева пробы угля связан с развитием эндотермических процессов разложения и продолжается до температуры 740°С когда завершается процесс выгорания кусочков угля.

Исследования кинетики влагоудаления навески угля в режиме изотермического нагрева при температуре 250°С и скорости омывания воздухом 2м/с позволил установить общую продолжительность сушки 229мин. при продолжительности периода возрастающей скорости влагоудаления 12мин. и периода постоянной скорости 20мин..

Используя закономерности движения сыпучих материалов в барабанной сушилке определена продолжительность сушки угля до средней относительной влажности 9 % 20–28мин. при степени заполнения ее рабочего пространства 20–25 %.

Особенности образования повторной влажности высушенной пробы угля в атмосфере влажного воздуха ограничивают общую продолжительность сушки не более 64–88 мин., а завершенность процесса влагоудаления при содержании остаточной влажности не менее 7 %.

Ключевые слова: удаление избыточной влаги, тепломассообменные процессы, кинетика сушки, механизм движения материалов в барабане, гигроскопическое поглощение влаги.

Одним из перспективных источников тепла в промышленности и бытовом хозяйстве является твердое органическое топливо в виде торфа, бурого и каменного угля. В условиях жесткой конкуренции на рынке энергетического топлива и повышенных объемов предложений над спросом со стороны потребителей особенно актуальным является повышение их энергетических показателей (удельной теплоты сгорания, содержания золы, серы и др.). Для улучшения энергетической ценности твердого топлива наиболее часто используют изменение содержания в нем избыточной влаги. Имеющиеся механические средства обезвоживания с применением современных высокоэнергетических грохотов, вибрационных и осадительно-фильтрующих центрифуг ограничены их техническими возможностями, что не может гарантировать стабильности качественных показателей получаемого топлива. Поэтому в качестве широко распространенного вспо-

могательного процесса обезвоживания природных полезных ископаемых используется термическая сушка с использованием различных источников теплоты (топочные газы, нагретый воздух, источники радиационного излучения, СВЧ и др.).

При сушке каменного угля удаляется преимущественно физико-химически и физико-механически связанная влага [1], которая удерживается в структуре слоя кускового топлива за счет адсорбционных, осмических, капиллярных и сил смачивания [2]. Для ее реализации используют сушилки различных типов: с непосредственным контактированием материала и теплоносителя (сушилки барабанные, кипящего слоя, турбинные и трубы-сушилки) и с косвенным нагревом материала через разделительную стенку (шнековые сушилки и сушилки с вращающимся барабаном) [3]. Наибольшее распространение в промышленности получили барабанные сушилки с прямоточным движением теплоносителя и нагреваемых материалов.

Для определения температурных условий сушки каменного угля марки Д, усредненная характеристика которого представлена в табл.1, были изучены закономерности развития тепломассообменных процессов при его нагреве со скоростью 5 град/мин. в атмосфере воздуха с получением полной кривой дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при скоростях нагрева 5 °С/мин. (на рис. 1).

Ее анализ показывает, что первоначальный нагрев образца угля сопровождается удалением избыточной влаги до температуры примерно 180°С. При дальнейшем повышении температуры нагрева образца начинается процесс увеличения его теплосодержания с постепенной активизацией химических процессов окисления углерода и выделением избыточного тепла. Эти явления заметно развиваются уже при температурах около 340 °С, когда происходит изменение массы навески (первый период). В этот же период возможно изменение поверхностных свойств отдельных кусков угля.

Таблица 1

Усредненная характеристика
экспериментальной пробы каменного угля марки Д

Наименование показателя	Метод испытания	Единицы измерения	Результат
Влага общая	ГОСТ 11014-2001	%	17,3
Зольность	ГОСТ 11022-95	%	10,1
Выход летучих	ГОСТ 6382-2001	%	42,3
Высшая теплота сгорания	ГОСТ 147-95	МДж/кг	30,59
Низшая теплота сгорания	ГОСТ 147-95	МДж/кг	21,41
Водород	ГОСТ 2408.1-88	%	5,6
Сера общая	ГОСТ 8606-93	%	0,25

Проба угля имела следующий гранулометрический состав:

Диаметр частиц, мм	Доля частиц, доли ед.
>10	0,275
5-10	0,15
2,5-5,0	0,24
1,5-2,5	0,086
0,75-1,5	0,045
0,375-0,25	0,081
0,125-0,375	0,071
0,05-0,125	0,04
<0,05	0,057

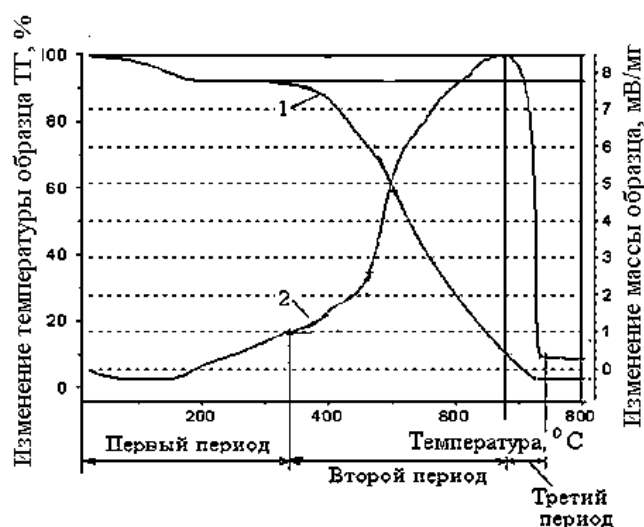
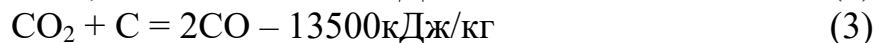
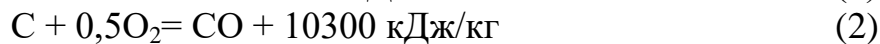


Рисунок 1. Кривые ДСК исходного образца угля, полученные при обжиге в окислительной атмосфере воздуха:
1 – кривая потери массы (ТТ), 2 – кривая тепловых эффектов (DTA)

При температуре около 436 °С в составе экспериментальных образцов начинают интенсивно развиваться процессы выделения теплоты от окисления углерода кислородом газовой атмосферы. Дальнейший нагрев образца (период 2) сопровождается существенным увеличением тепловыделений. Однако заметное изменение их массы отмечается только при температуре выше 460 °С. По достижении равновесия между процессами теплопоглощения и тепловыделения начинается устойчивый процесс горения угля. Эту температуру следует считать температурой его воспламенения.

Явления теплогенерации при окислении кускового угля протекают в соответствии с закономерностями горения твердого топлива [2], которые описываются реакциями



При этом реакции (1, 2) протекают с выделением тепла и развиваются в основном в поверхностном слое образцов, где имеется избыточная концентрация кислорода (период 2). Этот период продолжается до начала формирования условий преимущественного развития эндотермических процессов в структуре материалов в соответствии с уравнением (3). Осуществление этой реакции возможно только при повышенных температурах внешнего нагрева и наличии продуктов горения углерода CO_2 . Поэтому при температурах около 676°C наблюдается максимум тепловыделений от окисления углерода топлива. При дальнейшем увеличении температуры нагрева образцов получают преимущественное развитие эндотермические процессы газификации углерода угля (период 3) с понижением температуры его кусков, тепловой эффект которых превалирует до температуры внешнего нагрева около 740°C . Эта температура определяет интервал полного выгорания кусочков угля.

При реализации процесса сушки максимальную температуру теплоносителя в рабочем пространстве сушильного агрегата, которая определяет условия начала образования летучих, следует ограничить 460°C .

Процесс удаления физической влаги из насыпной массы угля может происходить как с наружной части отдельных частиц и приравнивается к процессу удаления влаги с открытой поверхности, так и глубинных слоев кусков навески. При нагреве влажных материалов давление паров воды на их поверхности возрастает и они диффундируют в поток сушильного агента, а возникающие при этом градиенты концентрации и температуры способствуют процессу обезвоживанию глубинных слоев отдельных кусков.

Исследование особенностей сушки насыпной пробы угля массой 71 г, размещаемой в плоском огнеупорном тигле, производили в рабочем пространстве электрической конвективной печи с рабочей температурой 250°C продуваемым потоком горячего воздуха со скоростью около 2 м/с. Эти условия близки к усредненным условиям сушки в барабанном сушиле. После определения массы исходной навески осуществляли процесс сушки пробы до достижения постоянства массы нагреваемых материалов. Поскольку выделение летучих из состава угля начинают происходить при температурах выше 460°C , то в исследуемом температурном интервале будет наблюдаться только процесс влагоудаления.

На рис.2, а представлен один из вариантов изменения массы влажного образца в процессе сушки.

В соответствии с полученными данными этот образец имел исходную относительную влажность 20,89 %, а абсолютную влажность 26,41 %. Общая длительность процесса сушки составила около 229 минут. Обобщенные данные по изменению относительной влажности пробы угля представлены на рис.2, б.

Анализ полученных данных позволяет установить, что время полной сушки образцов до требуемой относительной влажности 9 % составило около 63 минут.

Весь период сушки условно можно поделить на три характерных периода удаления влаги (рис.2, в).

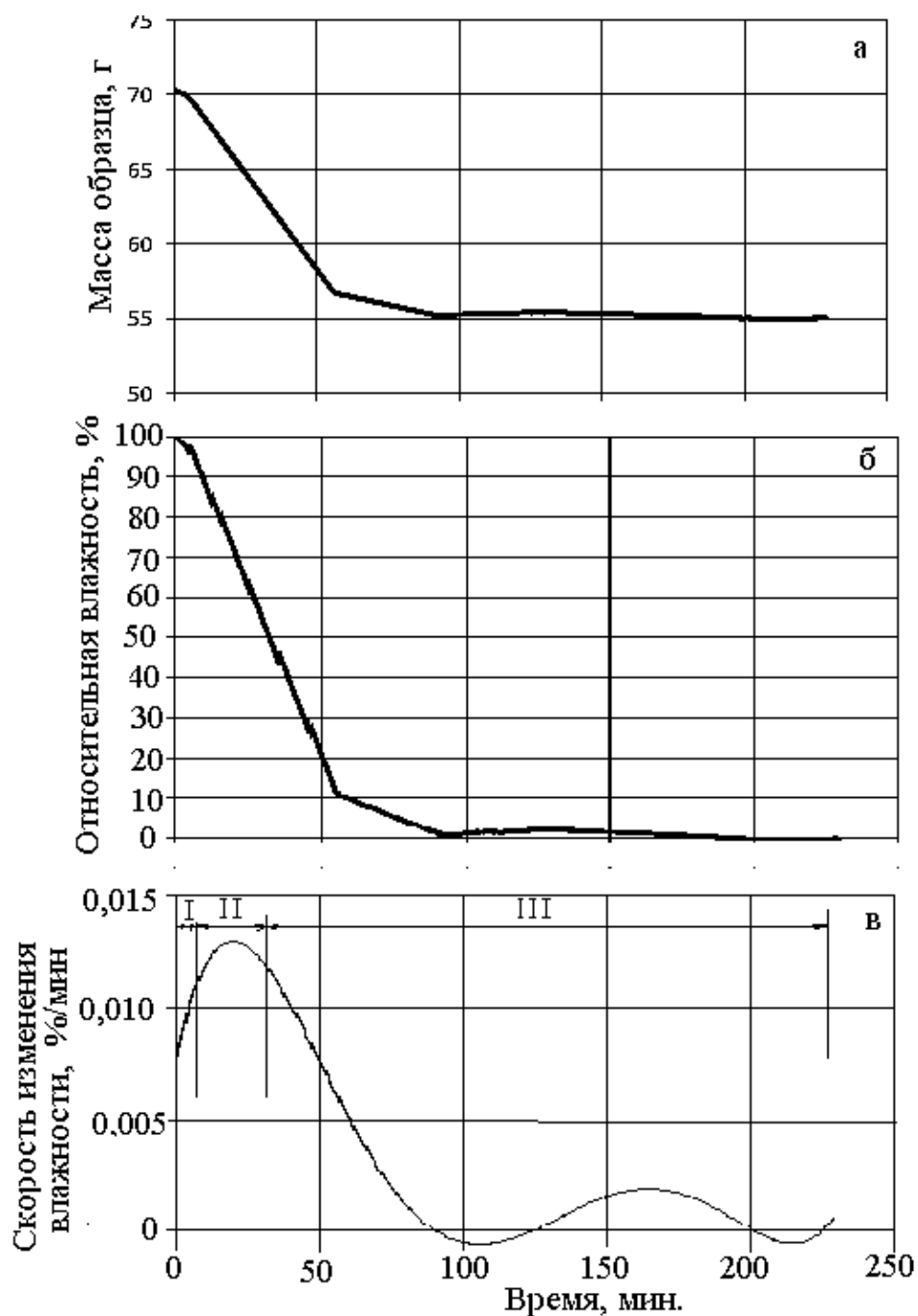


Рисунок 2. Изменение кинетики сушки пробы угля в процессе ее тепловой обработки:
 а – массы угля; б – относительной влажности образца;
 в – скорости изменения влажности

Первый период влагоудаления (I) близок к удалению влаги с открытой поверхности. При этом внутренняя диффузия паров воды настолько значительна, что скорость сушки ограничивается исключительно способностью водяных паров преодолевать сопротивление воздушного потока и

способностью омывающего воздуха освоить эти пары, т.е. скорость сушки ограничивается внешней диффузией и является величиной постоянной. Поэтому этот период получил название периода постоянной скорости сушки. Продолжительность этого периода составляет для исследуемой пробы около 12 минут.

По достижении максимального значения скорости сушки начинается период постоянной скорости влагоудаления (II). Этот период продолжается до достижения максимального значения скорости сушки, при которой начинают оказывать существенное влияние диффузионные процессы удаления влаги из глубинных слоев массы пробы угля. Поскольку масса отдельных его кусков отличается достаточной плотностью, то второй период ограничивается интервалом около 20 минут. После этого начинается третий период сушки (III) – период падающей скорости сушки, который требует значительного промежутка времени для достижения заданного уровня остаточной влаги.

При реализации процесса конвективной сушки угля в пересыпающемся слое барабанной сушилки происходит движение шихты по внутренней его поверхности в режиме «переката» с постепенным перемещением к разгрузочному концу. При этом в поперечном сечении барабана выделяют [4] два слоя (рис.3). Первый основной (1) состоит из частиц, прилегающих к закрытой внутренней поверхности барабана, и частиц смежных с ним. Этот слой занимает до 80 % всего объема материалов. Его отличительной особенностью является ограниченное только диффузией движения через него газов.

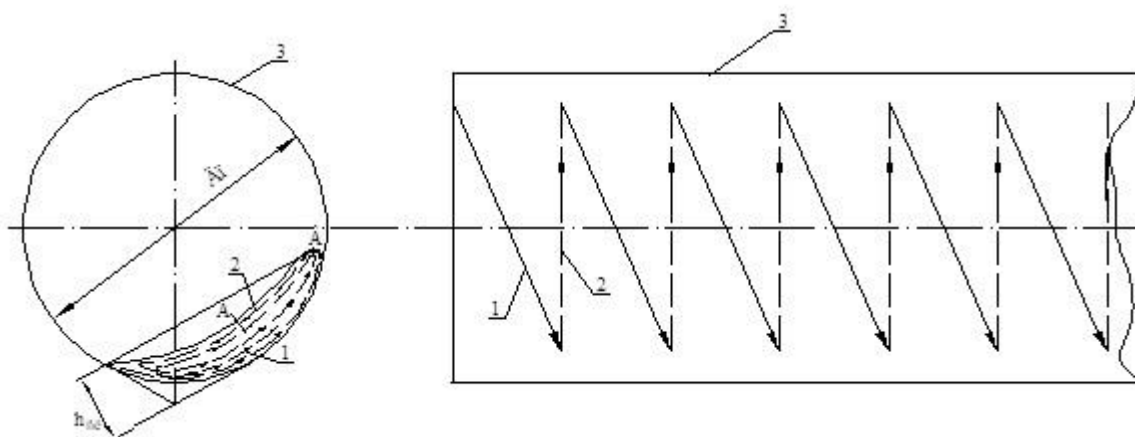


Рисунок 3. Схема движения частиц материала при вращении печи:
1 – путь скатывания; 2 – путь вращения; 3 – корпус печи

При вращении корпуса печи находящийся в соприкосновении с ним материал за счет сил трения поднимается вверх с возрастанием угла наклона поверхности насыпки к горизонту. По достижении угла естественного откоса (точка А) верхняя часть слоя оказывается в неравновесном состоянии и ссыпается вниз, стремясь восстановить угол естественного

го наклона, образуя второй слой (2), который перемещается по поверхности насыпки и соприкасается с потоком движущихся в свободном объеме печи газов. При этом более мелкие частицы проваливаются между крупными и совершают укороченные пути скатывания по концентрическим поверхностям с угловой скоростью равной скорости движения барабана, постепенно скапливаясь в глубине слоя. На место удаленной порции материала поднимается новая и цикл повторяется. Центр тяжести общей загрузки материалов остается практически на одном месте (точка Б), а основная его масса вращается вокруг него по сложной траектории.

При этом отмечается сегрегация отдельных компонентов в поперечном сечении барабана и по его длине. Внутри слоя материалов концентрируются мелкие частицы с более высокой насыпной массой, отличающиеся повышенным коэффициентом трения и движущиеся по траектории с меньшим радиусом. Частицы, обладающие меньшей инерцией и характеризующиеся увеличенным размером и плотностью, переходят по траектории ближе к открытой поверхности слоя. Они чаще появляются на поверхности движущихся материалов, проходят барабан быстрее, чем мелкие частицы. В этой части материалов насыпки располагаются преимущественно крупные элементы шихты. В осевом направлении перемещаются в основном частицы скатывающейся массы материалов. Высота этой части слоя зависит от степени заполнения барабана и его конструктивных параметров. Чем больше коэффициент заполнения рабочего пространства печи, тем ближе к загрузочному концу печи располагается слой максимальной высоты. Изменяя скорость вращения барабана n и угол наклона его оси α к горизонту, устанавливают высоту сыпающего слоя $h_{сл}$ и производительность агрегата Q насыпной плотностью $\rho_{нас}$. В соответствии с выражением

$$Q = \frac{\pi^2 \rho_{нас}}{360} * (\pi D^3) \lambda * (a\lambda - b) \operatorname{tg}(2\alpha), \quad (1)$$

По данным В.И.Коротича [5]

$$h_{сл} = (-0,0053 + 0,000636\lambda)D, \text{ мм}, \quad (2)$$

где D – внутренний диаметр барабана, м;

λ – центральный угол охвата шихты в поперечном сечении барабана;

$\alpha = 75 - 85$ град.

Экспериментально найденная нами зависимость среднего времени пребывания в рабочем пространстве отдельных частиц шихты (τ , с) может быть определена с ошибкой 7-15 % по эмпирической зависимости, установленной по результатам физического моделирования движения гранулированных материалов во вращающемся барабане:

$$\frac{\tau n}{100} = 3.678 * 10^{-5} \left(\frac{\alpha}{100}\right)^{-1,075} \left(\frac{d}{D}\right)^{0,12} \left(\frac{d}{L}\right)^{-0,873} \left(\frac{nQ}{D L \rho g}\right)^{0,1}, \quad (3)$$

где d – средний диаметр кусочка, м;

L – длина печи, м;

ρ – насыпная масса материала, кг/м³;

n – скорость вращения барабана, об/мин;
 g – ускорение свободного падения.

Следует отметить существенное изменение скоростей движения материалов, имеющих различные физические свойства. Крупные и более легкие частицы движутся с большей скоростью. При этом время пребывания частиц на открытой поверхности слоя в непосредственном контакте с нагреваемой газовой средой ($\tau_{пов.}$, с) в пределах изменения $h_{сл} = (0,04 - 0,2)D$ описывается выражением

$$\frac{\tau_{пов}}{\tau} = \frac{1}{1 + 15,72 \frac{h_{сл}}{D}}, \quad (4)$$

и колеблется в интервале 32-44 % от общего времени нахождения материалов в рабочем пространстве печи. При этом нагрев и тепловая обработка исходных компонентов шихты осуществляется в основном в пределах этого периода.

Таким образом, частицы исходной шихты, перемещаясь с холодного конца печи к разгрузке, совершают возвратно-поступательное движение в поперечном направлении с вращением их основной массы около центра тяжести загруженных материалов с периодическим выходом на поверхность слоя в первую очередь кусков крупных частиц шихты, которые взаимодействуют с газовой атмосферой рабочего пространства.

В соответствии с полученными данными по кинетике сушки пробы угля общее время этого процесса до достижения требуемой средней влажности слоя угля около 9 % будет ограничиваться в 20–28 минут в пределах изменения степени заполнения барабана 20–25 %.

В процессе исследований кинетики сушки пробы угля было отмечено, что при изменении условий удаления влаги и обеспечения различной степени завершенности процессов тепловой обработки при последующем хранении сухих гигроскопичных материалов во влажной атмосфере воздуха происходят процессы влагопоглощения с насыщением высушенных материалов влагой окружающей среды преимущественно за счет адсорбции молекул воды на активированной в процессе термической обработки поверхности материалов. Для оценки степени развития этого явления были выполнены исследования процесса сушки пробы угля массой 86 г с различными условиями завершенности процесса влагоудаления и изменяющимся содержанием остаточной влаги. После выдержки этой пробы при комнатной температуре и относительной влажности воздуха около 51 % в течение одних суток (24 часа) определяли их новую установившуюся влажность. Обобщенные данные этих опытов представлены в табл.2.

Анализ полученных данных показал, что увеличение времени тепловой обработки пробы угля примерно до 200 минут (время обработки в барабане около 64–88 минут) приводит к возрастанию влагосодержания в материалах после выдержки в атмосфере воздуха примерно с 7–9 до 20 %. При последующем увеличении времени предварительной тепловой обра-

ботки повторная установившаяся влажность угля за счет адсорбции влаги из атмосферы сокращается примерно до 15–16 %.

Таблица 2

Обобщенные результаты исследований насыщения проб угля влагой из атмосферы

№ опыта	Время тепловой обработки, мин	Начальная относительная влажность пробы, %	Остаточная относительная влажность пробы %
1	282	10,38	0
2	80	21,99	0,78
3	284	21,17	0,78
4	229	23,24	0
5	201	23,2	0
6	130	12,0	0
7	60	9,57	1,8
8	15	10,84	9,5
9	60	11,09	4,1

Кроме того, было установлено, что увеличение остаточной влажности в высушиваемой пробе угля до 7,0 % способствует замедлению развития в ней процессов адсорбции влаги из атмосферы с понижением повторной влажности выдержанных проб до 9,5 %.

Таким образом, процесс сушки угля следует ограничивать по времени тепловой обработки не более 200 минут (время обработки в барабане около 64–88 минут) и завершенности процесса влагоудаления при содержании остаточной влажности не менее 7 %. В противном случае высушенный уголь способен адсорбировать избыточную влагу из атмосферы с повышением начальной влажности даже выше чем она была в исходных материалах перед тепловой обработкой.

Выводы: 1. Для обеспечения безопасности сушки каменного угля максимальную температуру газов следует ограничивать 460 °С.

2. Длительность первого периода влагоудаления в условиях барабанной сушилки составляет 12 минут, периода постоянной скорости сушки 20 минут, а общее время этого процесса до достижения требуемой средней влажности слоя угля около 9 % составит 20–28 минут при степени заполнения его рабочего пространства 20–25 %.

3. Процесс сушки угля в условиях барабанной сушилки следует ограничивать не более 64–88 минут, а завершенность процесса влагоудаления при содержании остаточной влажности не менее 7 %.

Библиографический список

1. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. – 472с.
2. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. М.: Наука, 1979. – 384с.
3. Перегудов В.В., Роговой М.И. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей: Учебник. М.: Стройиздат, 1983. – 416с.

4. Коротич В.И. Теоретические основы технологии окучкования металлургического сырья. Агломерация: учеб. Пособие / В.И.Коротич, Ю.А.Фролов, Л.И.Каплун. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. –417 с.

5. Коротич В.И. Теоретические основы окомкования железорудных материалов. М.: Металлургия, 1966, 151с.

Моделирование процесса движения расплава в системе циркуляционный вакууматор-сталеразливочный ковш в металлургическом производстве

Метелкин А. А., доцент

Кабанов В. Д.

Астафьев Г. И.

Кабанов Д. В.

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Рассмотрены различные виды вакуумирования стали. Создана модель циркуляционного вакууматора в масштабе 1:15. Подобран расплав имитирующий движение жидкого металла в системе циркуляционный вакууматор-сталеразливочный ковш. Данная установка позволяет моделировать движение металла в системе циркуляционный вакууматор - сталеразливочный ковш, оценить скорости и направления движения расплава в данных металлургических агрегатах, и дает более полное представление о металлургических процессах в отделении внепечной обработки стали.

Ключевые слова: Циркуляционный вакууматор, движение расплава, действующая модель, система циркуляционный вакууматор – сталеразливочный ковш.

Современная техника предъявляет все более высокие требования к качеству стали. Для целого ряда изделий авиационной, радиоэлектронной, приборостроительной промышленности, для изготовления космической техники и т. п. требуется высококачественная сталь, содержащая ничтожно малое количество газов, неметаллических включений и других нежелательных примесей, очень однородная по свойствам, с отсутствием микропор и других дефектов. В некоторых случаях удовлетворить эти требования при обычном ведении плавки невозможно. Поэтому все больше возникает необходимость в вакуумировании стали.

Роль процессов внепечной вакуумной обработки стали настолько возросла, что это направление металлургами оценивается как одно из основных в развитии сталеплавильного производства высококачественного металла.

При обработке стали в вакууме в условиях высоких температур протекают следующие процессы: дегазация металла, т. е. уменьшение концентрации растворенных в металле газообразных продуктов; химическое взаимодействие между углеродом и кислородом, растворенным в стали, с образованием газообразных продуктов реакции и последующим удалением их из зоны реакций. Наиболее полно из металла удаляется водород. Глубина его удаления зависит от глубины вакуума и времени вакуумирования [1,2].

Существуют различные способы вакуумирования металла – способ вакуумирования в ковше, порционное вакуумирование и циркуляционное вакуумирование, и вакуумирование в струе металла. Наиболее эффективным является циркуляционное вакуумирование поэтому данный вид вакуумирования применяется на основных металлургических заводах.

Циркуляционное вакуумирование (RH-процесс)

Два патрубка вакууматора погружают в металл и под воздействием ферростатического давления он поднимается в вакуумную камеру. В один из патрубков начинают подавать инертный газ, в результате чего металл в этом патрубке направляется вверх, в вакуум-камеру, а по другому - стекает вниз, в ковш. Происходит циркуляция металла через вакуум-камеру.

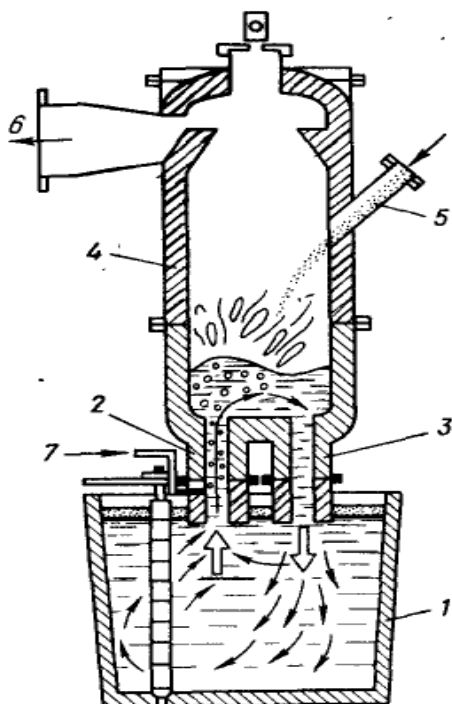


Рисунок 1.Схема установки циркуляционного вакуумирования

- 1 – ковш с металлом; 2 – патрубок для подъема металла; 3 – сливной патрубок;
4 – камера вакуумирования; 5 – отверстие для ввода раскислителей и легирующих;
6 – к вакуумному насосу; 7 – подача аргона

С целью изучения процесса вакуумирования металла в циркуляционном вакууматоре на технологической базе УрФУ НТИ (филиал) была создана гидродинамическая модель данного агрегата (рис. 2).

Созданная система включает в себя модель сталеразливочного ковша, модель циркуляционного вакууматора, систему подъемных механизмов и систему откачки воздуха. Система откачки воздуха необходима для имитации создания вакуума в вакуум – камере. Металлическая рама служит для поддержания вакууматора на весу. Далее мы подвесили вакууматор на раму так, чтобы можно было опускать и поднимать его на нужную нам высоту. Сам вакууматор выполнен из оргстекла для наглядности передвиже-

ния жидкости внутри системы, сталь ковш так же сделан из оргстекла. Система откачки воздуха прикреплена к верхней части модели вакууматора с целью создания разрежения воздуха внутри агрегата. В модели вакууматора присоединены два патрубка, к одному из них подведен шланг для подачи воздуха или другого газа из баллона, на баллоне установлен регулятор подачи воздуха и ротаметр, благодаря которому мы можем видеть сколько газа у нас поступает в патрубок и можем выбрать оптимальное количество подачи газа во впускной патрубок, этот патрубок называется впускной т.к. в него у нас затекает металл и оказывается в вакууматоре (в нашем случае раствор моделирующий расплав металла), второй патрубок называется сливной, из него металл выходит обратно в сталь ковш, тем самым происходит циркуляция расплава моделирующего сталь.

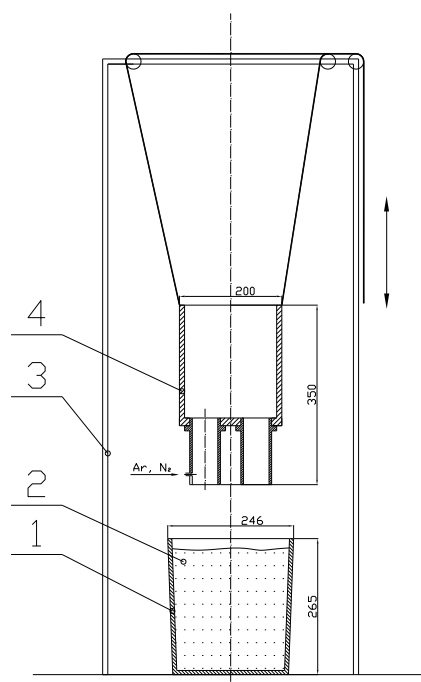


Рисунок 2. Гидродинамическая модель системы металлургических агрегатов вакуум-камера – сталеразливочный ковш:

- 1 – модель сталеразливочного ковша; 2 – расплав, имитирующий жидкую сталь;
- 3 – система блочных элементов для подъема и опускания вакууматора;
- 4 – модель циркуляционного вакууматора

Раствор моделирующий расплав металла включает в себя смесь воды, алюминиевой пудры и стирального порошка. Данный раствор прекрасно демонстрирует происходящее внутри вакууматора, что позволяет проводить качественные измерения по скорости и направлению его движения в системе циркуляционный вакууматор – сталеразливочный ковш и соответственно качественно оценить движение металла на действующих металлургических агрегатах.

Вывод

Таким образом, полученная установка позволяет моделировать движение металла в системе циркуляционный вакууматор – сталеразливочный ковш, оценить скорости и направления движения расплава в данных ме-

таллургических агрегатах, и дает более полное представление о металлургических процессах в отделении внепечной обработки стали.

Библиографический список

1. Бигеев, А. М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали [Текст] : учеб. для вузов / А. М. Бигеев, В. А. Бигеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Магнитогорск : МГТУ, 2000. – 544 с.
2. Линчевский, Б.В. Вакуумная металлургия стали и сплавов. – М.: Металлургия, 1970. – 258 с.

Влияние условий плавки на характер движения материалов в доменной печи

Миронов К. В.

Михалев В. А.

*АО «ЕВРАЗ НТМК», г. Нижний Тагил
Тлеугабулов Б. С., канд. техн. наук, доц.
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил*

Высокопроизводительная и экономичная работа доменной печи во многом определяется тем, как организовано движение и распределение газов и шихты в ее рабочем пространстве. На формирование газового потока оказывает влияние расположение и объем разрыхленной области, создающийся над фурменными очагами. Положение и конфигурация этой области, в свою очередь, определяется параметрами дутья. При увеличении интенсивности плавки наблюдается тенденция к сокращению длины окислительной зоны, увеличению объема квазитора разрыхления и небольшому отдалению вертикальной оси квазитора от оси печи. Это объясняется тем, что высокая производительность доменной печи неизбежно сопряжена с усилением работы периферийной зоны. На параметры квазиторов разрыхления существенное влияние оказывает диаметр фурм. Однако изменение диаметра фурм целесообразно только на небольшую величину. Положение и конфигурация квазитора разрыхления относительно оси доменной печи зависит от длины окислительной зоны: по мере увеличения этой длины ось эллипсоида приближается к оси печи при одновременном уменьшении высоты и ширины квазитора. Протяженность окислительной зоны определяется параметрами комбинированного дутья. Но существенное влияние на длину окислительной зоны оказывает только изменение температуры дутья. Увеличение расхода топливных добавок сокращает длину окислительной зоны и требует увеличения температуры дутья. Но это вдвойне повышает газодинамическую напряженность плавки и актуализирует необходимость повышения качества железорудного сырья и кокса. Практика управления доменными печами АО «ЕВРАЗ НТМК» подтверждает сделанные выводы.

Ключевые слова: доменная печь, разрыхление, эллипсоид, дутье, фурма, температура.

Доменное производство АО «ЕВРАЗ НТМК» располагает двумя печами – № 5 и № 6, еще одна печь (№ 7) находится в стадии завершения строительства. Доменные печи, полезным объемом 2200 м³ каждая, имеют по две чугунных летки, по два литейных двора и по 22 фурменных прибора. Загрузка печей полностью автоматизирована, включает конвейерную доставку шихты от бункерной эстакады к скипам и распределение шихты

на колошнике с помощью БЗУ лоткового типа. Наличие современных воздухонагревателей конструкции Я. Калугина позволяет нагревать дутье до температуры свыше 1200 °С. Применяемое дутье – комбинированное: обогащено кислородом и включает в себя природный газ и пылеугольное топливо. Выплавка чугуна в доменном цехе АО «ЕВРАЗ НТМК» характеризуется высокой интенсивностью плавки и низким расходом кокса из-за вдувания в больших количествах пылеугольного топлива и природного газа [1, 2]. Следует отметить, что производительность доменных печей за последние 10 лет постепенно возросла на 40 %. Это позволяет выполнить анализ влияния параметров плавки на характер движения материалов в доменной печи, что важно для экономичной и продолжительной работы доменных печей.

Высокопроизводительная и экономичная работа доменной печи во многом определяется тем, как организовано движение и распределение газов и шихты в ее рабочем пространстве. Одним из основных факторов, влияющим на характер движения газов в печи, является распределение шихты на колошнике во время загрузки [3]. Однако, на формирование газового потока в большей степени, чем распределение на колошнике, оказывают влияние расположение и объем разрыхленной области, создающейся над фурменными очагами, поскольку это существенно перераспределяет газовые потоки в столбе шихты. Положение и конфигурация этой области, в свою очередь, определяется параметрами дутья [4, 5].

Согласно существующим взглядам по механике, движения сыпучих тел поступление кокса в фурменные очаги, которые можно уподобить выпускным отверстиям, происходит через высокочастотное образование и разрушение динамически неустойчивых сводов [6]. Это приводит к возникновению над выпускными отверстиями (фурменными очагами) эллипсоидов разрыхления (рис. 1), объем которых приблизительно в 15 раз превышает объем эллипсоида выпуска. Вследствие различных скоростей движения в поперечном сечении эллипсоида разрыхления и появления в слое так называемых «плоскостей скольжения» порозность слоя в объеме шихты над фурменным очагом выше, чем в других участках, что и определяет движение материалов в доменной печи через данные области.

Совокупность отдельных эллипсоидов разрыхления над каждым фурменным очагом образует в доменной печи разрыхленный квазитор, через который шихта устремляется к фурменным очагам. Геометрические параметры квазитора изменяются не только во времени, но и по окружности печи. Это связано с неравномерностью распределения дутья по фурмам [7]. Колебания в расходах дутья находятся в пределах $\pm 20 \div 30$ % от среднего значения, что и определяет непостоянство размеров эллипсоидов над каждым фурменным очагом.

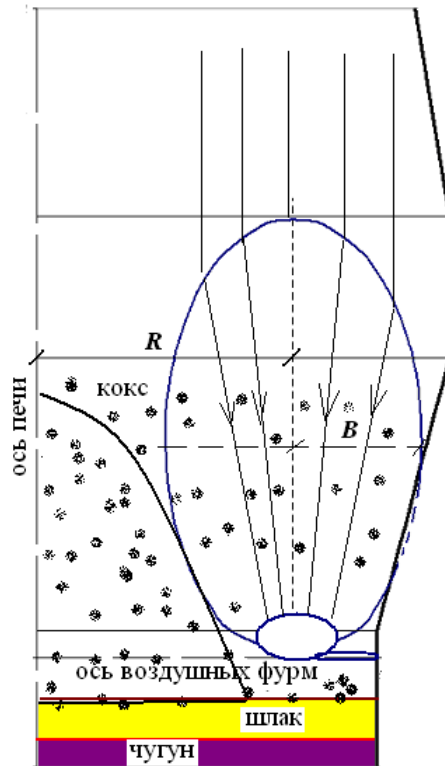


Рисунок 1. Расположение эллипсоида разрыхления над фурменным очагом

Средняя высота квазитора определяется из уравнения

$$H = \sqrt{\frac{n \cdot r^{3/2}}{\pi \cdot R} \cdot \left(\frac{W_0}{W_{III}}\right)^{3/2} \cdot \frac{1}{1 - \varepsilon}}, \quad (1)$$

где r – радиус окружности эквивалентный по площади проекции очага горения на горизонтальную площадь, м;

R – радиус квазитора (расстояние от оси печи до длинной оси эллипсоидов), м;

W_0 – скорость выхода кокса в очагах горения, м/с;

W_{III} – скорость движения шихты в районе вершины квазитора, м/с;

n – число фурменных очагов, шт.;

ε – показатель, характеризующий эксцентриситет эллипсоида разрыхления.

Данное уравнение предполагает определение скоростей движения шихты в вершине квазитора и при входе кусков кокса в фурменные очаги, которые, в свою очередь, зависят от протяженности зоны окисления, объемной скорости сгорания кокса, размеров профиля печи, количества и диаметра фурм. Расположение и конфигурация квазитора разрыхления относительно оси доменной печи наиболее существенно зависит от длины окислительной зоны.

Длина зоны циркуляции определялась по уравнению из источника [8]:

$$l_{ц} = 0,4539 + 8,1 \cdot 10^{-6} \cdot E_{к} - 5 \cdot 10^{-12} (E_{к})^2, \quad (2)$$

где $l_{ц}$ —длина зоны циркуляции, м;

$E_{к}$ – кинетическая энергия дутья, Дж.

Для расчетного определения протяженности углекислотной зоны использована рекомендация из [9]:

$$l_{ок} = 1,28 \cdot l_{ц}, \quad (3)$$

где $l_{ок}$ — длина углекислотной зоны, м.

Расчетный анализ изменения усредненных значений протяженности окислительной зоны, параметров квазиторазрыхления и его расположения относительно оси печи за разные годовые периоды работы на примере доменной печи № 5 приведен в табл. 1.

Таблица 1

Параметры квазиторазрыхления доменной печи № 5 за разные годы

Параметры плавки и квазиторазрыхления	Периоды работы, год					
	2007	2010	2012	2013	2015	2016
Интенсивность плавки, т/(м ³ сут)	2,28	2,74	3,12	3,16	3,15	3,19
Длина окислительной зоны, м	1,26	1,36	1,23	1,19	1,22	1,22
Высота квазиторазрыхления, м	8,12	9,04	8,7	9,92	9,74	9,76
Ширина квазиторазрыхления, м	3,7	3,94	3,8	4,33	4,24	4,26
Радиус квазиторазрыхления (R), м	3,92	3,87	3,94	3,96	3,93	3,94

При увеличении интенсивности плавки (производительности печи) наблюдается тенденция к сокращению длины окислительной зоны, увеличению объема квазиторазрыхления и небольшому отдалению вертикальной оси квазиторазрыхления от оси печи. Особенно заметно увеличивается средняя ширина (толщина) квазиторазрыхления (рис. 2).

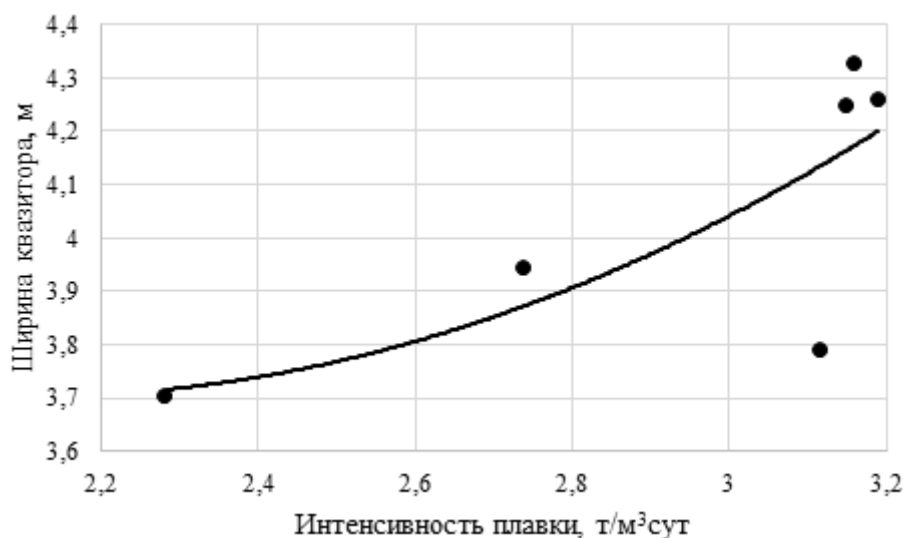


Рисунок 2. Влияние интенсивности плавки на ширину квазиторазрыхления

Это объясняется тем, что высокая производительность доменной печи неизбежно сопряжена с усилением работы периферийной зоны, удельная площадь которой на единицу отрезка радиуса увеличивается от центра к стенкам. Активный поток шихты при увеличении интенсивности плавки все более приближается к футеровке и предопределяет работу печей с минимальной толщиной гарнисажа. Это, в свою очередь, повышает износ кладки, усиливает нагрузку на холодильники и сокращает срок работы доменной печи между капитальными ремонтами.

Например, в первые 2–3 года работы доменной печи № 5 с производительностью на уровне 2,3 т/(м³сут) вершины эллипсоидов разрыхления не достигали шахты, а нижняя граница контактировала только с футеровкой заплечиков. По мере наращивания производительности до 3 т/(м³сут), расположение эллипсоидов разрыхления сместилось ближе к стенкам печи, усилилось взаимодействие с футеровкой заплечиков, однако воздействие на футеровку шахты и фурменной зоны изменилось не существенно. Высота квазитора хоть и превысила границу распара и шахты, но расстояние до футеровки шахты составляла в среднем более 1 м. Последующая интенсификация плавки при высоком расходе топливных добавок и сокращении расхода кокса до уровня 330 кг/т еще более сместило расположение эллипсоидов разрыхления ближе к стенкам печи. Высота квазитора достигла почти 10 м. При этом поток материалов стал взаимодействовать не только с футеровкой заплечиков, но и с футеровкой фурменной зоны, и с футеровкой шахты. В последние годы работы, как видно из таблицы 1, положение и размеры квазитора разрыхления стабилизированы, вероятно, на оптимальном уровне. Исключен контакт потока шихты с футеровкой фурменной зоны, увеличено расстояние от вершины квазитора до футеровки шахты. При этом интенсивность плавки не уменьшилась и даже возросла. В связи с этим, актуально определение условий, влияющих на характер движения материалов в доменной печи.

На параметры квазиторов разрыхления существенное влияние оказывает диаметр фурм. Расчет данного влияния при прочих равных условиях представлен в табл. 2.

Таблица 2

Влияние диаметра фурм на параметры квазиторов разрыхления и потери давления на фурмах

Параметры	Диаметр фурм, мм		
	160	150	140
Длина окислительной зоны, м	1,19	1,36	1,59
Высота квазитора, м	9,9	9,0	8,2
Ширина квазитора, м	4,3	3,9	3,6
Радиус квазитора(<i>R</i>), м	3,96	3,87	3,75
Потери давления на фурмах, атм	0,145	0,197	0,276

Однако следует учитывать, что уменьшение диаметра фурм приводит к увеличению эксцентриситета окислительной зоны и повышению потерь давления дутья. Оптимальная длина окислительной зоны зависит от

диаметра горна. Для доменных печей АО «ЕВРАЗ НТМК» эта величина должна находиться в пределах 1,22÷1,25 м. Общие потери давления дутья рассчитывались по формуле (4):

$$\Delta P = \frac{n \cdot \lambda \cdot l_{\phi} \cdot \rho_{\text{дут}} \cdot v^2 \cdot (t + 273)}{2 \cdot 273 \cdot (1 + P_{\text{дут}}) \cdot d_{\phi}}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент газодинамического сопротивления;

l_{ϕ} – длина фурмы, мм;

$\rho_{\text{дут}}$ – плотность дутья, кг/м³;

v – скорость дутья, м/с;

t – температура дутья, °С;

$P_{\text{дут}}$ – давление дутья, атм;

d_{ϕ} – диаметр фурм, мм.

Изменение диаметра фурм, как видно из результатов расчетов, целесообразно только на небольшую величину. При уменьшении диаметра фурм от 160 до 140 мм потери давления дутья возрастают почти в два раза, а длина окислительной зоны будет намного превышать оптимальный уровень. Это приведет к снижению интенсивности работы периферийной части печи, а значит и производительности в целом.

В то же время, расположение и конфигурация квазиторазрыхлителя относительно оси доменной печи зависит от длины окислительной зоны: по мере увеличения этой длины ось эллипсоида приближается к оси печи при одновременном уменьшении высоты и ширины квазиторазрыхлителя (рис. 3).

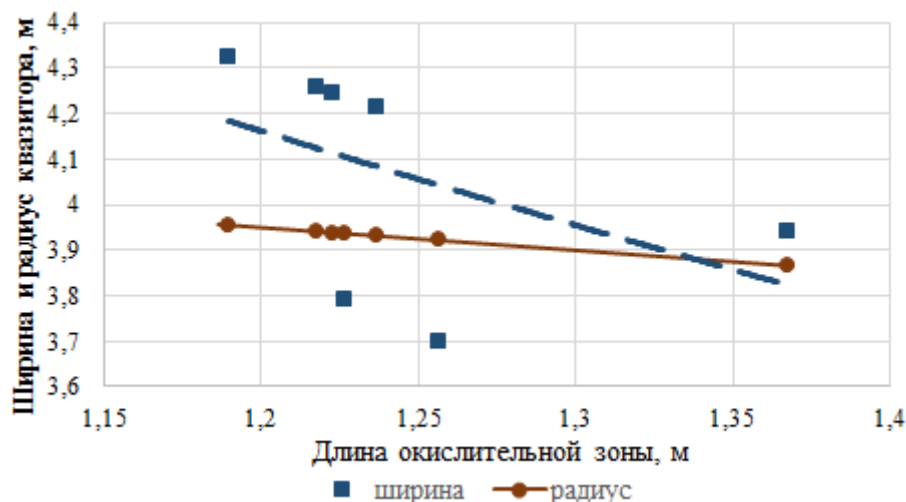


Рисунок 3. Влияние длины окислительной зоны на параметры квазиторазрыхлителя

Протяженность окислительной зоны, в свою очередь, определяется параметрами комбинированного дутья. Однако относительное влияние отдельных параметров дутья на изменение длины этой зоны не равнозначное (рис. 4).



Рисунок 4. Влияние изменения параметров дутья на изменение длины окислительной зоны

Как видно из рис. 4, существенное влияние на длину окислительной зоны оказывает только изменение температуры дутья. Изменение влажности дутья практически не изменяет данный параметр. Изменение содержания кислорода в дутье в широких пределах приводит к относительному изменению протяженности окислительной зоны всего лишь на $\sim 0,5$ %. Регулирование же температуры дутья в небольших приращениях позволяет оперативно и тонко влиять на усиление или ослабление движения материалов в периферийной области.

Параметром комбинированного дутья является также расход топливных добавок. По мере увеличения расхода топливных добавок (пылеугольного топлива (ПУТ) и природного газа (ПГ)) длина окислительной зоны сокращается (рис. 5), что вполне естественно, а граница квазиторазрыхления все более приближается к стенкам печи.

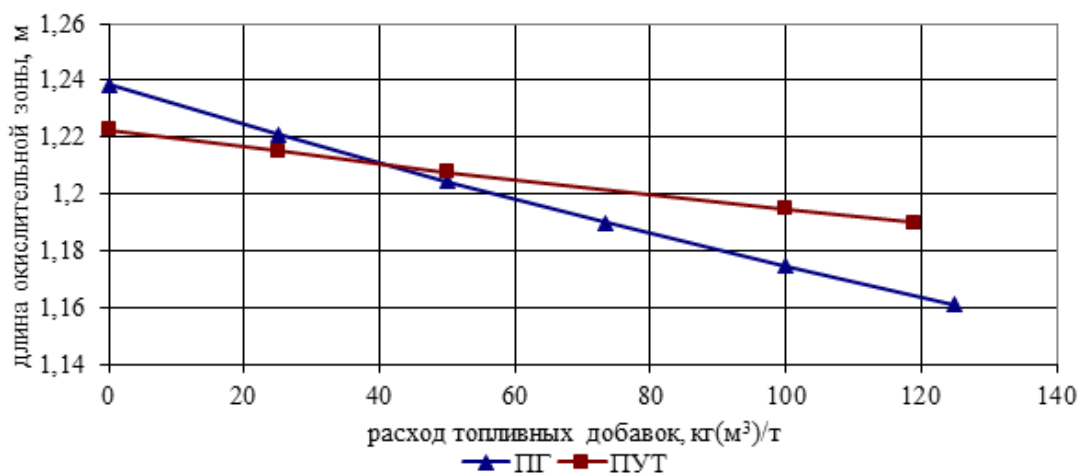


Рисунок 5. Влияние расхода топливных добавок на изменение длины окислительной зоны

Однако, как видно из рис. 5, увеличение расхода природного газа существенней сокращает длину окислительной зоны, чем увеличение расхода ПУТ при прочих равных условиях. При увеличении расхода топливных добавок требуется, из условия стабилизации разрыхленной области, увеличение температуры дутья. Но это вдвойне повышает газодинамическую напряженность плавки [10] и актуализирует необходимость повышения качества железорудного сырья и кокса.

В целом, по результатам выполненного анализа установлено, что существенное влияние на характер движения материалов в доменной печи и, в частности, в периферийной области оказывает изменение температуры дутья. Практический опыт работы подтверждает сделанные выводы.

Библиографический список

1. Kushnarev, A. V. System improvement of vanadium hot metal process at EV-RAZ NTMK / A.V. Kushnarev, V.V. Filippov, V.A. Mikhalev, B.S. Tleugabulov // CIS Iron and Steel Review. – 2017. – V. 13. – P. 13–17.
2. Филиппов, В.В. Развитие теории и технологии выплавки ванадиевого чугуна с применением пылеугольного топлива / В.В. Филиппов, В.А. Михалев, К.В. Миронов и др. // Черная металлургия :Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2017. – № 4. – С. 22 – 25.
3. Большаков, В. И. Оценка эффективности применения загрузочных устройств на доменных печах / В.И.Большаков, И.Г.Товаровский, Ф.М.Шутылев // Сталь. –2005. –№ 7. –С. 17–20.
4. Тлеугабулов, С. М. К совершенствованию системы управления восстановительно-плавильным процессом в высокой шахтной печи типа доменной / С.М. Тлеугабулов, Г.М. Койшина, Б.С. Тлеугабулов и др. // Сталь. –2012. –№5. –С. 12–16.
5. Тлеугабулов, С. М. Управление процессами в фурменной и противоточной зонах доменной печи регулированием расхода топливных добавок / С.М. Тлеугабулов, Б.С. Тлеугабулов, Г.М. Койшина и др. // Сталь. –2015. –№ 8.– С. 16–20.
6. Фиалков, Б.С. Кинетика движения и характер горения кокса в доменной печи / Б.С.Фиалков, В.Т.Плицын. –М.: Металлургия, 1971. –288 с.
7. Бугаев, К. М. Распределение газов в доменных печах /К.М. Бугаев. – М.: Металлургия, 1974. – 176 с.
8. Лялюк, В. П. Современные проблемы технологии доменной плавки / В.П. Лялюк. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – 164 с.
9. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / Под ред. Н.А. Спирина. –Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005.– 301 с.
10. Смирнов, Л. А. Некоторые теоретические аспекты технологии совместного вдувания природного газа и пылеугольного топлива / Л. А. Смирнов, Б. С. Тлеугабулов, С. А. Загайнов [и др.] // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2016. – № 5. – С. 19–22.

Использование нефтекокса в составе пылеугольного топлива для доменной плавки

Половец М. В.

Тлеугабулов Б. С., канд. техн. наук, доц.
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Использование пылеугольного топлива (ПУТ) в доменной плавке является перспективным направлением по снижению себестоимости чугуна, и такая технология применяется в настоящее время на трех крупных комбинатах России. Для приготовления ПУТ на российских предприятиях используются, в основном, некоксуемые тощие и газовые угли Кузбасса, что не обеспечивает желаемого снижения затрат на производство чугуна для АО «ЕВРАЗ НТМК» и ПАО «НЛМК» из-за высоких транспортных затрат. В данной работе выполнен расчетный анализ по возможности использования нефтекокса в составе пылеугольного топлива для доменной плавки. Качество нефтекокса отличается низкой зольностью, умеренным содержанием летучих, но повышенным содержанием серы. Стоимость нефтекокса, непригодного для алюминиевых заводов, почти в 2 раза ниже стоимости энергетических каменных углей. Расчеты проводились по комплексному методу определения состава доменной шихты и показателей доменной плавки при совместном вдувании природного газа и угольной пыли. Результаты расчета показали значительную экономическую эффективность от введения нефтекокса в состав ПУТ. Основным препятствием по использованию нефтекокса является высокое содержание в нем серы. Поэтому оптимальная доля нефтекокса в составе ПУТ находится на уровне 25 % при общем расходе ПУТ 50 кг/т чугуна и до 10 % при расходе ПУТ 100 кг/т чугуна. Использование нефтекокса в рекомендуемых расходах позволяет существенно снизить себестоимость чугуна при обеспечении качества чугуна на должном уровне.

Ключевые слова: доменная печь, пылеугольное топливо (ПУТ), нефтекокс, плавка, чугун.

Использование пылеугольного топлива (ПУТ) в доменной плавке является перспективным направлением по снижению затрат на производство чугуна и получает все большее распространение [1]. В России вернулись к применению ПУТ на новом качественном уровне с 2013 г. Современные установки по приготовлению и вдуванию ПУТ в настоящее время имеются на трех крупных комбинатах России (АО «ЕВРАЗ НТМК», АО «ЕВРАЗ ОЗСМК», ПАО «НЛМК»), а доля российского чугуна, выплавляемого с использованием ПУТ, составляет около 30 % от общего объема производства [2].

Целью использования ПУТ является снижение себестоимости чугуна за счет минимизации расхода кокса путем замещения его более дешевыми топливными добавками [3]. Для производства ПУТ чаще всего используют малозольные угли, как правило, смесь из 2–3 типов углей. Для приготовления ПУТ на российских предприятиях используются, в основном, некоксуемые тощие и газовые угли Кузбасса. Это позволяет повысить долю спекающихся углей в составе коксовой шихты и улучшить качество кокса при сохранении объема поставок, но не обеспечивает желаемого снижения затрат на производство чугуна, поскольку при вдувании ПУТ замещается не только кокс, но и дешевый природный газ. Особенно это касается АО

«ЕВРАЗ НТМК» и ПАО «НЛМК», для которых транспортная составляющая в себестоимости ПУТ достигает 25–30 %. В связи с этим появляется необходимость в проработке вопроса по частичной замене каменного угля альтернативными, менее дорогими углеродсодержащими материалами. Дополнительным критерием выбора таких материалов является относительная (по сравнению с Кузбассом) близость их производства. Поэтому в данной работе выполнен расчетный анализ по возможности использования нефтекокса в составе пылеугольного топлива для доменной плавки.

Нефтяной кокс получают при замедленном коксовании (от 24 до 40 час.), в основном, тяжелых фракций первичной переработки нефти, полученные на установках атмосферно-вакуумной перегонки, и крекинг-остатков вторичных термических процессов переработки нефти [4]. Качество нефтекокса отличается низкой зольностью (до 1 %), умеренным содержанием летучих (от 9 до 15 %), повышенным содержанием серы (от 1,3 до 4,5 %). Низкая зольность нефтекокса обуславливает высокое содержание в нем нелетучего углерода (на уровне 85–90 %) и высокую калорийность его сгорания (~ 8000 ккал/кг).

Нефтяной кокс в России производится на девяти предприятиях, из них на шести объем выработки кокса превышает 150 тыс. т в год [5]. Основной объем (65–70 %) производимого нефтекокса потребляется алюминиевыми заводами для изготовления электродов. Остальное количество нефтекокса (пониженного качества) используется в качестве топлива и имеет невысокую стоимость.

Наиболее крупные производители нефтекокса расположены в Иркутской, Волгоградской, Самарской, Пермской, Омской областях, а также в Республике Башкортостан. Исходя из принципа территориальной близости, для ПАО «НЛМК» предпочтительно получение такого продукта из Волгограда или Новокуйбышевска (Самарская обл.), для АО «ЕВРАЗ НТМК» – из Перми или Уфы. При замещении части углей из Кузбассанефтекоksom из Волгограда снижение транспортных затрат для ПАО «НЛМК» составит около 1500 руб/т. Максимальное снижение транспортных затрат для АО «ЕВРАЗ НТМК» – около 1000 руб/т – будет при использовании нефтекокса из Перми. В пермском нефтекоксе по сравнению с башкирским также значительно меньше содержание серы (2,5 % против 3,85 %).

Для расчета показателей доменной плавки использовалась методика [6]. Расчеты выполнены только для условий работы доменного цеха АО «ЕВРАЗ НТМК». За базу сравнения приняты показатели работы в 2016 г. Принятое качество пермского нефтекокса в сравнении с качеством существовавшего ПУТ представлено в табл.

Таблица

Качество топлива для доменной плавки

Вид топлива	Зола, %	Летучие, %	S, %	Углерод, %
Нефтекокc	0,94	9,5	2,56	87,0
ПУТ	7,93	18,07	0,36	74,0

Результаты расчета показали, что при увеличении доли нефтекокса в составе ПУТ от 0 до 30 % затраты на топливо, которые включают сумму удельных затрат на кокс, природный газ и ПУТ, снижаются на 2 % (рис. 1). Это обеспечивает экономическую эффективность от внедрения данного мероприятия примерно в 300 млн рублей в год.

При увеличении расхода ПУТ до 100 кг/т и сокращении расхода природного газа до 70 м³/т (для обеспечения постоянства газодинамического напряжения доменной плавки, согласно [3]), увеличение доли нефтекокса в составе ПУТ снижает затраты на топливо еще больше (рис. 1).

Основным препятствием по использованию нефтекокса является высокое содержание в нем серы, что может привести к получению некондиционного чугуна и увеличить затраты при переработке чугуна в сталь.

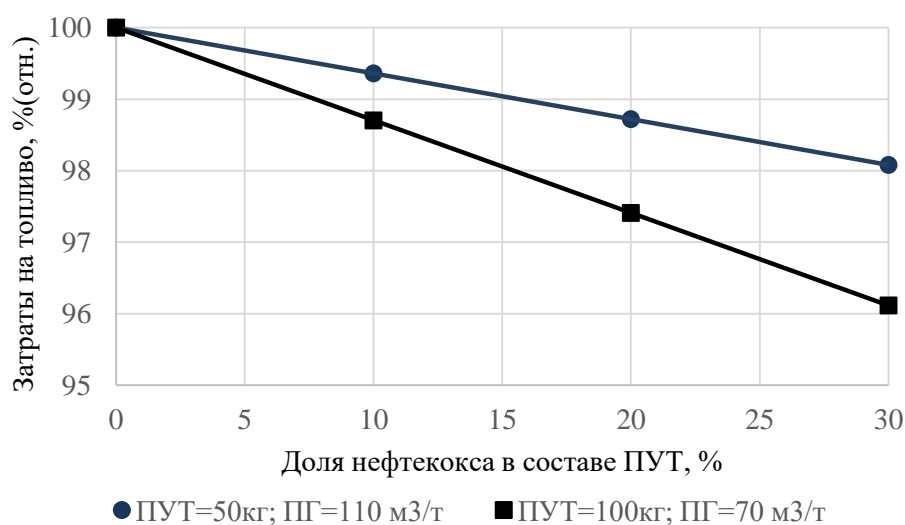


Рис. 1. Влияние доли нефтекокса в составе ПУТ на относительное снижение затрат на топливо

Расчет содержания серы в чугуне производился по балансовому уравнению (1):

$$[S] = \frac{S^{\text{III}}(1 - \lambda_s)}{1 + L_s \cdot \text{III}}, \quad (1)$$

где S^{III} – общий приход серы в печь, кг/кг чугуна; λ_s – количество серы, уносимой из печи газом, в долях от общего прихода; III – выход шлака, кг/кг чугуна; $L_s = (S)/[S]$ – коэффициент распределения серы между чугуном и шлаком.

При расчете содержания серы в чугуне учитывалось, кроме изменения прихода серы в печь и выхода шлака, то, что сера вдуваемого топлива распределяется только между чугуном и шлаком (т. е. $\lambda_s = 0$).

Результаты расчетов представлены на рис. 2, из которого видно, что по мере увеличения доли нефтекокса в составе ПУТ планомерно возрастает и содержание серы в чугуне (рис. 2). Причем при увеличении общего

расхода ПУТ (от 50 до 100 кг/т) динамика этого возрастания прогрессирует.

По действующим стандартам предприятия содержание серы в чугуне не должно превышать 0,03 %. Для обеспечения выполнения данного показателя при стабильности состава чугуна 85–90 %, расчетное среднее содержание серы должно быть менее 0,027 %. Тогда оптимальным будет доля нефтекокса в составе ПУТ на уровне 25 % при общем расходе ПУТ 50 кг/т чугуна и до 10 % при расходе ПУТ 100 кг/т чугуна. Использование нефтекокса в рекомендуемых расходах позволяет снизить себестоимость чугуна примерно на 50 рублей и получить годовую экономию свыше 200 млн рублей при обеспечении качества чугуна на должном уровне.

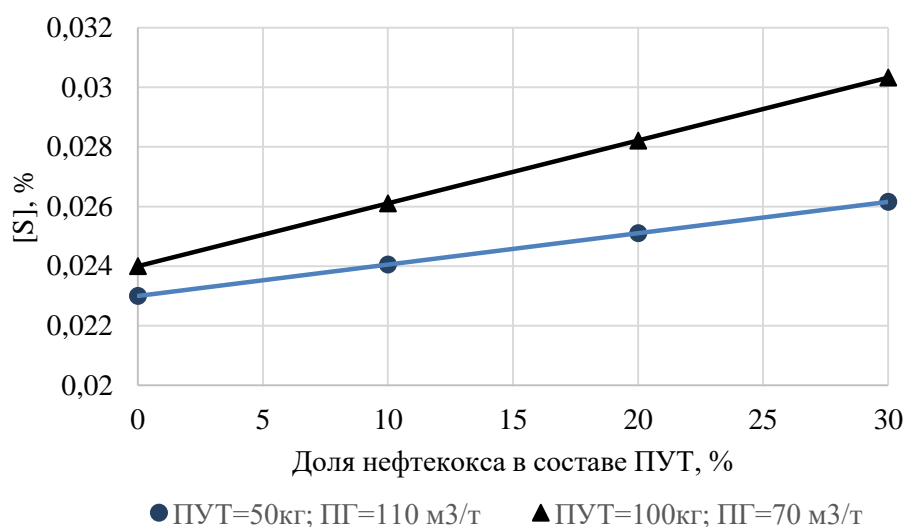


Рис. 2. Влияние доли нефтекокса в составе ПУТ на изменение содержания серы в чугуне

Для снижения содержания серы в чугуне и обеспечения этого значения на уровне 0,024 % необходимо, в дальнейшем, проработать вопросы:

- оптимизации состава шлака;
- возможности использования предложения [7], по которому в состав ПУТ дополнительно вводится десульфуратор;
- возможности снижения содержания серы в нефтекоксе;
- возможности снижения общего прихода серы в доменную печь.

Библиографический список

1. Н. Тохорпус, А. Steeghs and J. van den Boer, PCI at the start of the 21st century, 60th Ironmaking Conference Proceedings, Baltimore, USA, 60 (2001) 736–742.
2. Филиппов, В. В. Преимущества и риски технологии доменной плавки с использованием пылеугольного топлива / В.В.Филиппов, В.А.Михалев, К.В.Миронов, С.А.Загайнов, Б. С. Тлеугабдулов // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2017. – № 1. – С. 38–42.
3. Смирнов, Л. А. Некоторые теоретические аспекты технологии совместного вдувания природного газа и пылеугольного топлива / Л. А. Смирнов, Б. С. Тлеугабду-

лов, С. А. Загайнов [и др.] // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». – 2016. – № 5. – С. 19–22.

4. Сюняев, З. И. Производство, облагораживание и применение нефтяного кокса – М. : Химия, 1973. – 296 с.

5. Теляшев, Э. Г. Нефтяной кокс в России – перспективные технологии / Э. Г. Теляшев, И. Р. Хайрудинов, М. М. Ахметов // Территория нефтегаз. – 2006. – № 4. – С. 66–71.

6. Методика расчета состава доменной шихты и показателей доменной плавки при совместном вдувании природного газа и угольной пыли : метод. указания к выполнению практ. и курс. работ / Б. С. Тлеугабулов. – Нижний Тагил : НТИ (ф) УрФУ, 2015. – 56 с.

7. Патент RU № 2490316 11.05.2012. Пылеугольное топливо для доменной плавки. Кобелев В. А., Чернавин А. Ю., Запорин В. П. и др.

Возможность использования ассиметричных валков шаропрокатных станов для получения устойчивого режима прокатки

Рубцов В. Ю.

АО «ЕВРАЗ НТМК», г. Нижний Тагил

Шевченко О. И., д-р техн. наук

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Представлена схема поперечно-винтовой прокатки шаров с применением ассиметричных валков. Ассиметричность в виде подрезки реборды на одном валке по диаметру, приводит к увеличению ширины контактной поверхности проводки, тем самым создавая устойчивый режим прокатки. Рассмотрена возможность применения данных калибровок по условиям захвата и разнице скоростей деформации от валков. Аналитическим методом определена рекомендуемая величина подрезки реборды.

Ключевые слова: шаропрокатный стан, поперечно-винтовая прокатка, калибровка валков, проводка, подрезка реборды, скорость деформации.

Введение. Поперечно-винтовая прокатка шаровых заготовок осуществляется между двумя вращающимися валками -1,2 (рис. 1), на бочках которых нарезаны винтовые калибры. Профиль и размеры калибра соответствуют профилю прокатываемого изделия. Оси прокатных валков обычно наклонены под небольшим углом к оси прокатываемой заготовки - 3, за счет чего обеспечивается осевая подача металла в валках. Передний конец нагретого прутка задается во вращающиеся валки прокатного стана. При этом заготовка начинает вращаться и одновременно продвигаться по оси прокатки. В валках вращающаяся заготовка обжимается ребордами калибра и приобретает форму шара, соединенного перемычкой с остальной заготовкой. При дальнейшем продвижении в валках шар калибруется и полностью отделяется от прутка. Для удержания обжимаемой заготовки на оси прокатки служат проводки -5. При однозаходной калибровке за каждый оборот валков прокатывается один шар.

Очаг деформации при прокатке шаров имеет два основных участка: формирующий, где заготовка обжимается с изменением формы и размеров

винтовой реборды; отделочный, где форма и размеры реборды остаются неизменными, а обжатие осуществляется за счет овализации заготовки [1].

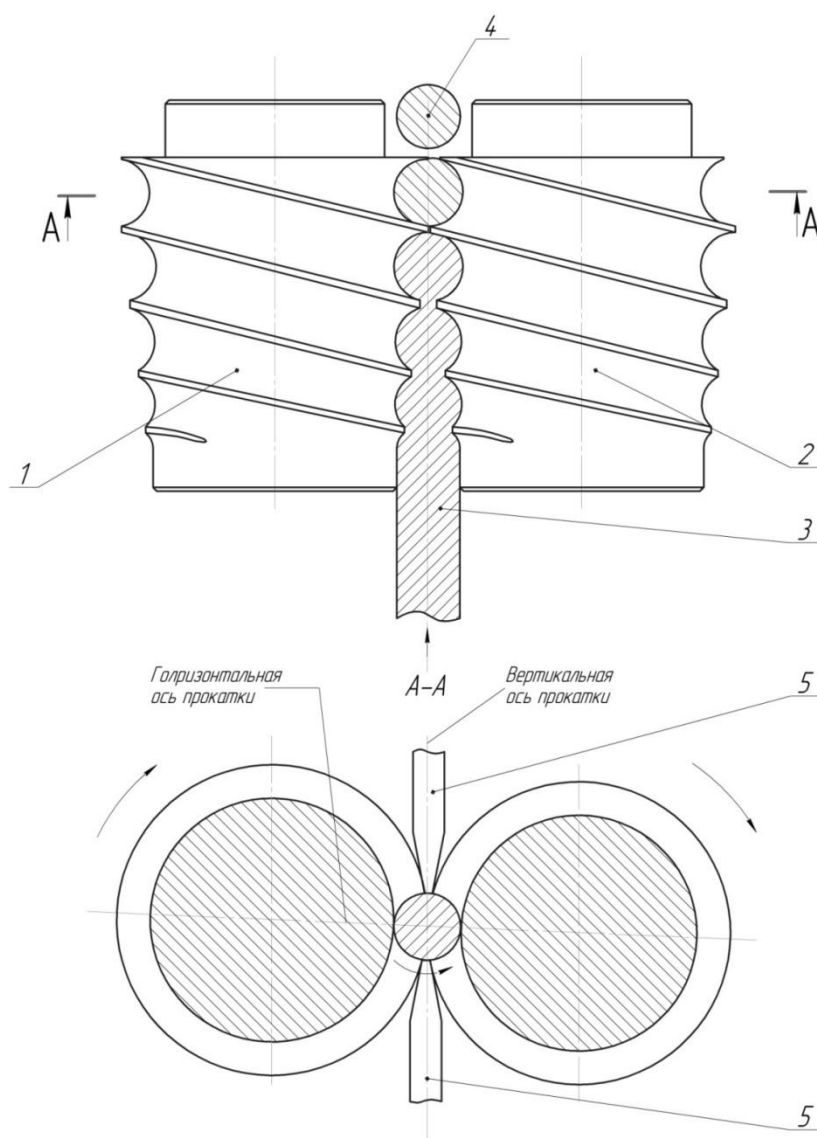


Рисунок 1. Существующая схема прокатки

Отделение шара происходит чаще всего за счет того, что один валок (подрезной) – 2, в конце калибрующей части перед установкой подрезается на меньший диаметр по длине примерно пол-оборота, а другой валок (неподрезной), остается с максимальным наружным диаметром. При их сведении подрезной не доходит до оси прокатки, а неподрезной доводится до оси либо перекрывает ее на 1–2 мм, что обеспечивает отделение шара в постоянно вращающейся заготовке.

Также существуют другие виды калибровок, где отделение шара производится за счет увеличения ширины реборды в отделочной части валка, что вызывает отделение шаров за счет разрыва перемычек. Например, такой метод предложили авторы [2] (рис. 2), который применили в дальнейшем при изготовлении валков на новый шаропрокатный стан АО «ЕВРАЗ-Нижнетагильский металлургический комбинат».

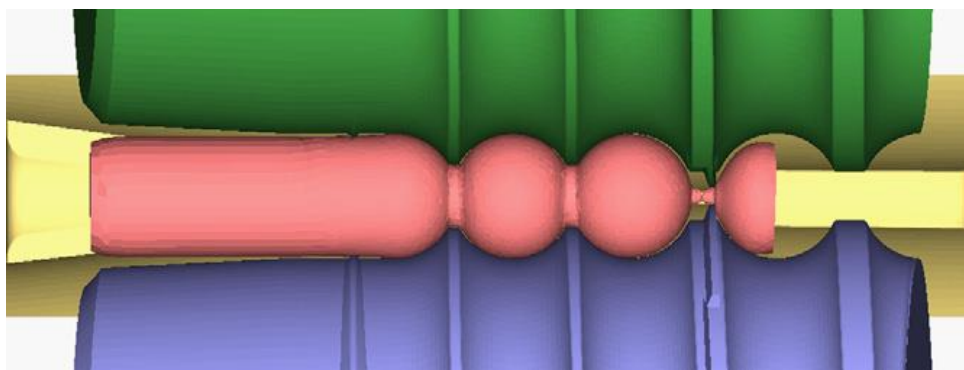


Рисунок 2. «Моделирование процесса поперечно-винтовой прокатки, показывающее разрыв перемычки стальных шаров» (прим. пер. [2, с. 4])

В настоящее время независимо от выбранной калибровки существует проблема износа проводок. Для некоторых профилей срок работы проводки составляет 5–6 ч, что требует дополнительного времени простоя стана на их замену. Целью данной работы является определить способ увеличения ширины поверхности проводки, как наиболее изнашиваемого элемента, и допустимые пределы по ее увеличению.

Возможность использования ассиметричных валков для увеличения ширины проводки

В настоящий момент ширина поверхности проводки, имеющей контакт с заготовкой, за счет сведения валков незначительна. Так для производства шара $\text{Ø}120$ мм она составляет 15-20 мм, в зависимости от применяемой калибровки и размеров валков (рис. 3).



А



Б

Рисунок 3. А – проводка для шара $\text{Ø}120$, Б – комплект проводок для шара $\text{Ø}60$

Для шара $\varnothing 60$ мм, при диаметре валков 700 мм, она может составлять в самой узкой части 3 мм, что приведет к моментальному износу. В качестве решения данной задачи предлагается использовать подрезку (подрезного) валка не на пол-оборота от края валка, а на более протяженную часть валка (рис. 4).

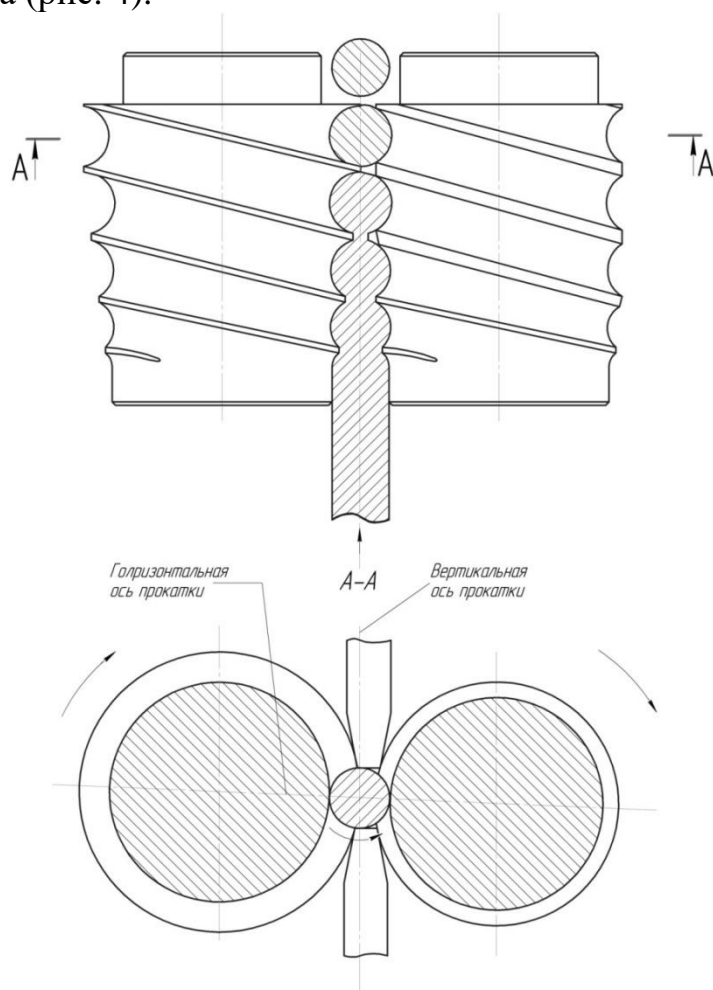


Рисунок 4. Предлагаемая схема прокатки

Согласно такой схемы калибровки, сначала будет происходить формирование шара за счет обоих валков. Производить подрезку валка в зоне захвата не допускается, т.к. в данной зоне валок испытывает наибольшие удельные контактные давления и имеют наибольший износ, что было представлено в работе [3]. После осуществления захвата заготовки и формирования части получаемого, один валок выводится из работы за счет подрезанной реборды и служи только в качестве опорной контактной поверхности. Остаточное формирование шара происходит за счет одного валка, реборды которого продолжают нарастать и врезаться в заготовку. В конечном счете, произойдет отделение шара за счет перекрещивающихся оси прокатки и реборды валка.

Необходимо определить лимитирующий параметры в применении данной технологии и оптимальное значение подрезки реборды для конкретных калибровок.

Определим возможность использования данной калибровки, применяя сравнительную характеристику по нескольким допустимым значениям.

1. Условия захвата (придание вращения и осевого перемещения заготовки). Данное условие выполняется при значениях подъема реборды менее, чем 0,2 радиуса заготовки. При превышении врезания реборды более, чем на 0,2 радиуса и невыполнении условия вращения или осевого перемещения заготовки, режим работы нарушается и процесс переходит в образование «рейки» или «карандаша». В нашем случае нецелесообразно производить подрезку валка по диаметру менее чем на 0,5 от радиуса заготовки.

2. Разница скоростей деформации. За счет того что равнодействующая, приложенная от всех точек контакта на неподрезном валке будет иметь больший радиус, чем равнодействующая от точек контакта на подрезном валке, то скорость деформации на неподрезном валке будет несколько выше. Разница в скоростях деформации может вызвать скручивание заготовки во время прокатки.

Согласно известной формулы [4], скорость деформации при постоянной частоте вращения валков определяется по формуле:

$$U_{cp} = \frac{1}{b} \int_0^b U_x dx \quad (1)$$

где U_x – скорость деформации элементарной точки,

b – условная ширина контакта металла с валком

$$U_x = \frac{\pi n_b A_0 - \rho}{30} \frac{x}{\rho \sqrt{r^2 + x^2}} \quad (2)$$

где n_b – частота вращения валка,

r – условный радиус (расстояние от оси заготовки до элементарной точки приложения).

A_0 – межосевое расстояние (ось валка и ось заготовки)

ρ – радиус заготовки

x – точка приложения по оси x .

Для неподрезного валка скорость деформации будет определяться по всей длине заготовки, а для подрезного только в рабочей зоне, т.к. в дальнейшем он не будет участвовать в деформации.

Выводим формулу для определения разницы средних скоростей деформации в %.

$$\Delta U_{cp} = \left(\frac{\frac{1}{b_n} \int_0^{b_n} \frac{\pi n_b A_0 - \rho}{30} \frac{x}{\rho \sqrt{r_n^2 + x^2}} dx}{\frac{1}{b_n} \int_0^{b_n} \frac{\pi n_b A_0 - \rho}{30} \frac{y}{\rho \sqrt{r_n^2 + y^2}} dy} - 1 \right) 100 \% . \quad (3)$$

Проведя упрощения получим

$$\Delta U_{\text{cp}} = \left(\int_0^{b_H} \int_0^{b_{\Pi}} \sqrt{\frac{r_{\Pi}^2 + y^2}{r_H^2 + x^2}} dx dy - 1 \right) 100 \% . \quad (3)$$

Так при подрезке валка по диаметру на 0,5 от радиуса заготовки получим $\Delta U_{\text{cp}}=26\%$.

Составим диаграмму, показывающую разницу в средних скоростях деформаций в зависимости от подрезки реборд по диаметру на разную величину.

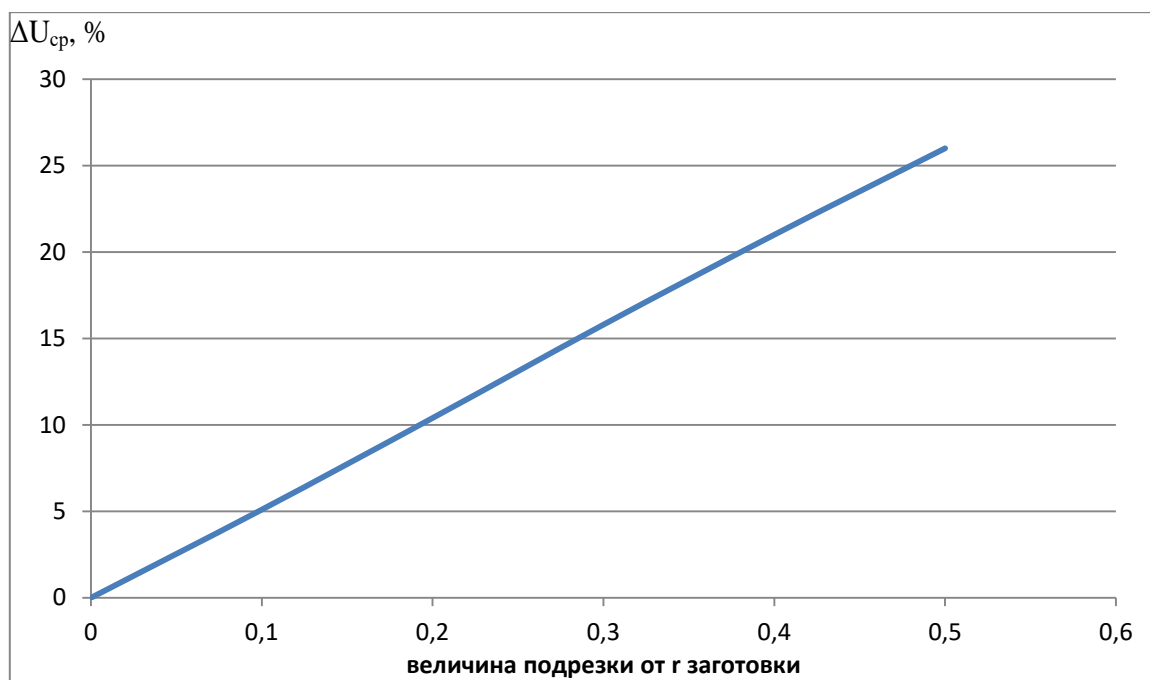


Рисунок 5. Зависимость разницы средней скорости деформации ассиметричных валков при подрезке реборды на значение кратное радиусу заготовки

Основываясь на том, что при прокатке рекомендуемая разница скоростей деформации элементарных точек 10%, по данному графику видим, что допустимая подрезка реборды на валке составит 0,2 от радиуса заготовки. Так ширина поверхности контакта проводки для шара $\text{Ø}60$, составит 9 мм, что значительно увеличит срок службы проводки и позволит обеспечить упрощенную геометрию проводки, что в конечном счете скажется на технологичности ее изготовления.

Выводы:

1. В работе было предложено для увеличения срока службы направляющих проводок и обеспечения более устойчивого процесса прокатки использовать ассиметричные шаропрокатные валки. В качестве ассиметричности рассматривается подрезка реборды на одном валке по диаметру, для увеличения возможной ширины контактной поверхности проводки.

2. Определены факторы, которые будут критическими в выборе величины подрезки реборды, составлена диаграмма показывающая разни-

цу в средних скоростях деформаций в зависимости от подрезки реборд по диаметру на разную величину. По данной диаграмме определена рекомендуемая величина подрезки реборды, которая составит 20% от радиуса заготовки.

Библиографический список

1. Перетятыко В.Н. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1. / В.П. Перетятыко, А.С. Климов, М.В. Филиппова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2013. - № 4. - С.27-30.
2. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls / Z. Pater [and etc.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. - 2013. - Т. 67. - pp.1-7.
3. Рубцов В.Ю. Применение переменной скорости вращения валков в поперечно-винтовой прокатке с целью повышения их ресурса / В.Ю. Рубцов, О.И. Шевченко // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». - 2017. - № 11 (1415). - С. 72-77.
4. Целиков А.И. Специальные прокатные станы. / А.И. Целиков, М.В. Барбарич – М.: Металлургия, 1971 - 336 с.

Образование вредных соединений в сточных водах газоочисток

Сазонова Е. А., канд. хим. наук
Трапезников Ю. Ф., канд. техн. наук, доц.
ПИЖТ УрГУПС, г. Пермь, Россия

Интеграция российских предприятий в мировое производство предполагает комплексное использование и переработку отходов химического производства в товарные продукты. В статье рассмотрены вопросы утилизации хлора и его соединений в титано-магниевом производстве. Разработана технология обезвреживания отходящих газов, предотвращающая сброс сильно засоленных сточных вод за счет утилизации продукта взаимодействия вредностей отходящих газов и химического компонента поглощительной суспензии газоочистки в производстве собственного карналлитового сырья.

В производстве неорганических продуктов из хлорсодержащего сырья образуются токсичные отходы производства, в частности хлор и его соединения. Для обезвреживания отходов производства и их утилизации требуются значительные затраты. Поэтому весьма актуально решение проблемы переработки отходов в товарные продукты, получаемые побочно целевым продуктам.

Особенно актуальна эта проблема для российских предприятий в связи с интеграцией их в мировое производство. С одной стороны комплексное использование сырья повышает конкурентоспособность товарной продукции, с другой стороны повышает надежность предприятия, как поставщика товара в соответствии с принципами ISO 14000. В частности, в металлургии титана и магния проблема утилизации хлора и его соединений стоит особо остро в связи с большими объемами образующихся отходов и их высокой токсичностью. Отходящие газы содержат кроме хлора его соединения как в твердом виде – различные хлориды металлов, так и в

газообразном виде – хлороводород. Кроме того, стоки процесса обезвреживания отходящих газов содержат кислородсодержащие соединения хлора, что определяет необходимость проведения процесса обезвреживания их.

В технологии титано-магниевого производства отходящие газы различных установок содержат вредные примеси - хлор (Cl_2) до 20 г/м^3 и хлороводород (HCl) до 15 г/м^3 [1]. Обезвреживание их осуществляют орошением известковым молоком. В результате хемосорбции Cl_2 происходит конверсия этой газообразной вредности частично в водорастворимые кислородсодержащие соединения хлора - гипохлорит ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) и хлорат ($\text{Ca}(\text{ClO}_3)_2$) кальция, являющиеся также вредностями. Концентрация их в отработанном известковом молоке, г/дм^3 : $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ – 40-100, $\text{Ca}(\text{ClO}_3)_2$ -10-40. Отработанное молоко - гипохлоритную пульпу перед сбросом в коллектор сточных вод обрабатывают при $80\text{-}100^\circ\text{C}$ в течение 6...10 часов вначале острым паром и затем гидросульфидом или тиосульфатом натрия; в этом случае происходит разложение гипохлорита на хлорид и частично хлорат кальция. Обезвреживание от хлорат-ионов практически не происходит. Следует отметить, что $\text{Ca}(\text{ClO}_3)_2$ является так называемым «растительным» ядом.

Исследовано образование кислородсодержащих соединений хлора – гипохлорита кальция $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ и хлората кальция $\text{Ca}(\text{ClO}_3)_2$ в циркулирующем известковом молоке при обезвреживании отходящих газов. Замеры содержания их в сточных водах предприятия на входе в очистные сооружения комбината, проведенные ежедневно в течение трех месяцев, показали, что концентрация хлорат-иона изменяется в пределах от 0.4 до 7.6 г/дм^3 и среднее значение составило $1,8 \text{ г/дм}^3$. Эти изменения концентрации связаны с периодичностью сброса отработанного молока в сточные воды предприятия. Наличие в стоках гипохлорит-ионов практически не отмечалось.

Для выяснения механизма образования хлората кальция исследовали изменение состава молока в течение процесса обезвреживания. Изменение содержания гипохлорита, хлората и оксида кальция в течение процесса поглощения хлора известковым молоком исследовали на промышленных газоочистных установках. Наиболее интенсивно хлорат-ионы образуются при обезвреживании отходящих газов на первой стадии, характеризующихся более высокой концентрацией хлора (до 30 г/дм^3). Причем содержание хлорат-ионов резко увеличивается при снижении концентрации оксида кальция в циркулирующем молоке ниже 5 г/дм^3 (рис. 1).

Установлено, что большее количество $\text{Ca}(\text{ClO}_3)_2$ образуется на первых ступенях (до 12 г/дм^3), а на вторых ступенях $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ (до 110 г/дм^3) Исходя из того, что молоко заменяется в три-четыре раза чаще на первых системах, чем на вторых, пересчет на среднюю концентрацию кислородсодержащих соединений хлора в отработанном молоке, поступающем с обеих ступеней газоочистки на обезвреживание показывает, г/дм^3 : 20-26 $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ и 3-4 $\text{Ca}(\text{ClO}_3)_2$.

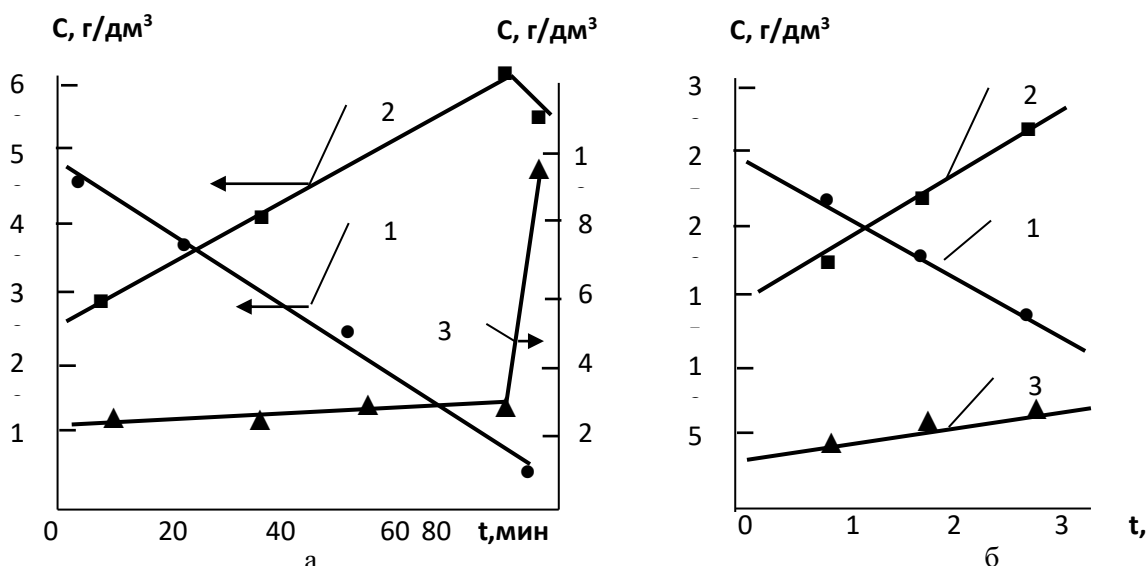


Рисунок 1. Изменение состава циркулирующего молока в течение цикла орошения на первой (а) и второй (б) стадиях газоочистки (1 – оксид кальция; 2 – гипохлорит кальция; 3 – хлорат кальция)

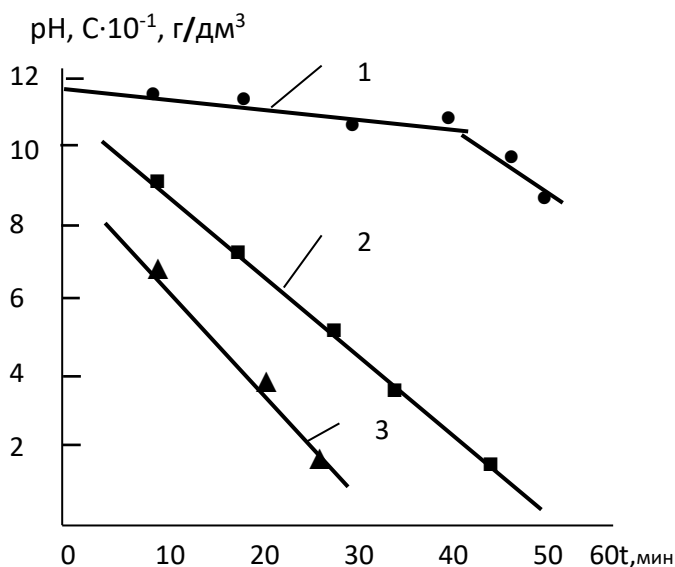


Рисунок 2. Изменение pH и концентрации циркулирующего молока: 1 – pH; 2 – CaO в циркуляционном баке; 3 – CaO в молоке на выходе из скруббера

Анализ полученных данных о концентрациях кислородсодержащих соединений хлора в отработанном молоке, поступающем с различных газоочисток на обезвреживание, показывает, что чем выше содержание хлора в очищаемом газе и при этом также ниже содержание хлороводорода, тем выше содержание хлорат-иона в отработанном молоке.

Это явление объясняется тем, что с образованием слабокислой среды, начинается процесс интенсивного образование хлората кальция. Замеры содержания оксида кальция в циркулирующей суспензии показали (рис. 2), что в поступающей из скруббера (кривая 3), ниже, чем находящейся в циркуляционном баке (кривая 2) и эта разность увеличивается к окончанию

цикла орошения до 4-5 г/дм³. Замеры величины рН этих потоков молока показали, что он изменяется симбатно содержанию оксида кальция и различие составляет от 1 до 3 единиц к окончанию цикла обезвреживания.

Таким образом, источником поступления хлорат-ионов в сточные воды предприятия являются газоочистные установки. В процессе обезвреживания отходящих газов образуется хлорат кальция в циркулирующем известковом молоке в количестве до 2-8 г/дм³, при этом содержание СаО снижается до 4-17 кг/м³. В случае продолжения циркуляции молока в системе газоочистки сначала образуется кислая среда в части потока молока находящегося в объеме скруббера и в магистрали слива молока в циркуляционный бак, в результате чего происходит резкое увеличение образования хлората кальция – до 14-40 г/дм³ перед окончанием процесса обезвреживания. Содержание СаО при образовании кислой среды ниже 4 г/дм³. Установлено, что образование кислой среды при наличии СаО происходит в результате снижения активности СаО, так как образующийся гипохлорит кальция переводит его в водонерастворимую форму в виде соединения Са(СlO)₂·Са(ОН)₂·4Н₂O. В связи с этим на первой стадии газоочистки необходимо исключить снижение содержания оксида кальция в молоке ниже 5 г/дм³ [2].

В качестве альтернативы разработана технология обезвреживания отходящих газов, предотвращающая сброс сильно засоленных сточных вод за счет утилизации продукта взаимодействия вредностей отходящих газов и химического компонента поглотительной суспензии газоочистки в производстве собственного карналлитового сырья. Из этого карналлитового сырья получают металлический магний по существующей технологии. При этом хлор закольцован в технологической схеме. В качестве химического компонента поглотительной суспензии применяются оксидные магниесодержащие материалы - брусит, магнезит, доломит, серпентинит, которые не образуют гипохлорит-ион при обезвреживании хлорсодержащих газов. Разработаны технологические инструкции и проведены опытные и опытно - промышленные испытания предлагаемых процессов.

Библиографический список

1. Трапезников Ю.Ф. Ресурсосберегающая технология обезвреживания отходящих газов титано - магниевое производства водной суспензией оксидных магниесодержащих материалов / Ю.Ф. Трапезников, Ю.П. Кудрявский, В.Г. Березюк, Л.В. Василенко, В.В. Тетерин, А.В. Пенский // Экологические проблемы промышленных регионов : Тезисы научно-технической конференции, проведенной в рамках международной выставки «Уралэкология-техноген' 99», Екатеринбург, Дом книги 1999. С. 80.

2. Трапезников Ю.Ф. Применение твердых хемосорбентов в технологии обезвреживания отходящих газов // Экология и промышленность России, 2009. № 12. С. 8–10.

Теоретические основы восстановительной плавки стали

Тлеугабулов С. М., д-р техн.наук, профессор
Тажиев Е. Б., докторант PhD
КазНТУ им. Сатпаева К. И., г. Алматы, Казахстан

Традиционно сложившаяся двух стадийная технология производства стали, особенно при переработке комплексного железорудного сырья, характеризуется низкой эффективностью, связанной с потерями значительной части металлов, огромными выбросами газов и дисперсных отходов. В работе описаны механизмы прямого восстановления металлов углеродом и теоретические основы подготовки рудоугольных окатышей для последующей выплавки стали, в противовес существующей технологии переработки оксидного окучкованного сырья с использованием потоков горячих восстановительных газов.

Теоретические положения содержат методику формирования рудоугольных окатышей из дисперсных оксидных концентратов и углеродсодержащего восстановительного реагента в стехиометрических массовых соотношениях для полного восстановления металлов. Реализация восстановительных процессов должна базироваться на теоретических аспектах всеобщего донорно-акцепторного механизма. Только исходя из этой позиции, практическая организация восстановительно-плавильных процессов решает проблему эффективной переработки комплексного железорудного сырья.

Экспериментальные исследования включали металлизацию и последующую восстановительную плавку рудоугольных окатышей, приготовленных из трех видов концентратов с добавлением древесного угля и извести в расчетных пропорциях. Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований на базе комплексных марганецсодержащих и ванадийсодержащих железорудных концентратов доказали возможность преодоления излишнего науглероживания металла и реализации восстановительной плавки с получением природно-легирующей стали непосредственно из рудоугольных окатышей.

Ключевые слова: прямое восстановление, углерод, газ, железо, сталь, легирование.

Практически все металлы (за исключением только Au, Pt, реже Ag, Hg, Cu, встречающиеся в природе в самородном состоянии) находятся в рудах (недрах) в виде химических соединений с другими элементами – неметаллами, но, преимущественно – с кислородом. Массовая доля химических элементов в земной коре распределена в порядке уменьшения: 1) кислород; 2) кремний, 3) алюминий; 4) железо; ...9) титан и т.д. На долю кислорода приходится почти половина (47 %) массы земной коры, а земная кора на 99,6 % состоит из оксидных соединений, как простых, так и сложных. Отсюда следует, что естественные химические соединения образованы на основе закона действующих масс в виде оксидов кремния, алюминия, железа, титана и т.д. Поэтому извлечение металлов из оксидных соединений металлов связано с организацией восстановительных процессов. Природа подарила человечеству и источники восстановительных реагентов: уголь и углеводородные ресурсы.

Уголь и углеводородное топливо с одной стороны и металлооксидные ресурсы – с другой во взаимосвязи с развитием деятельности *HomoSa-*

привели к сегодняшнему состоянию развития металлургии железа и стали. Отсюда и можно начинать обсуждение проблемы металлургии.

Сложившаяся на сегодня во всем мире двух стадийная технология получения стали, основанная на комплексе «Домна – сталеплавильный агрегат», занимает ведущее положение в черной металлургии. На ее долю приходится более 85 % мирового производства [1], а более 70 % стали в мире выплавляется по схеме «доменная печь – кислородный конвертер» [2].

На основе формирования и совершенствования двух стадийной технологии производства стали достигнуто уровень развития современной индустрии. Вместе с тем, расширение производства стали и сплавов, распространение его в мировом пространстве преподносит человечеству проблему, связанную с накоплением выбросов газа и твердых отходов и нарушением экологической безопасности поверхности Земли. Для решения этой проблемы были дважды приняты международные Киотское и Парижское соглашения. Однако практика показывает, что командно-административная политика, как в отдельно взятых государствах, так и в международном масштабе не решает данную проблему. Проблема может быть решена введением новой технической политики, направленной на революционное преобразование технологических процессов. В основе такой технической политики должна лежать высокоэффективная технология.

Металлургия железа и стали базируется на подготовке и переработке железорудного сырья.

В течение длительного периода развития традиционной технологии металлургического производства существенно выработаны основные запасы гематитовых и магнетитовых железорудных месторождений. Дальнейшее развитие металлургии связано с подготовкой и переработкой комплексного железорудного сырья, добываемых из новых рудных месторождений, в составе которых, кроме основного металла – железа, содержатся трудновосстановимые, но полезные легирующие металлы. Они не могут быть восстановлены до металлического состояния потоками горячих восстановительных газов (ГВГ) в процессах, основанных на известном адсорбционно-автокаталитическом механизме (ААКМ) [3]. Только в условиях доменной плавки подготовленного комплексного железорудного сырья трудновосстановимые элементы частично восстанавливаются до металлического состояния и приводят к выплавке природно-легированного чугуна. Но по традиционной технологии это происходит на первой стадии комплекса. Вторая стадия посвящена окислительной переплавке чугуна в кислородных конвертерах, при которой все полезные легирующие элементы и значительная часть железа окисляются и переходят в состав конвертерного шлака, а выплавляемая сталь является сырой, загрязненной оксидными примесями. Конвертерный шлак (с содержанием 3,0–4,5% Mn; 2,0–3,0% Cr; 22–25% Fe) на большинстве металлургических комбинатов приходится выбрасывать в отвалы [4], только ванадийсодержащий конвертерный шлак подвергается вторичной переработке для извлечения ванадия [5, 6].

Как видно, традиционно сложившаяся двух стадийная технология производства стали, в целом, особенно при переработке комплексного железорудного сырья, характеризуется низкой эффективностью, связанной с потерями значительной части металлов, огромными выбросами газов и дисперсных отходов. Все эти негативные последствия вытекают из недостатков организации восстановительно-плавильных процессов. Теоретическая основа восстановительных процессов не подкреплена механизмами, вытекающими из закономерностей фундаментальных наук. Реализация восстановительных процессов должна базироваться на теоретических аспектах всеобщего донорно-акцепторного механизма. Только исходя из этой позиции, практическая организация восстановительно-плавильных процессов решает проблему эффективной переработки комплексного железорудного сырья.

Процессы восстановления металлов могут и должны базироваться на двух «китах»: богом данных массовых ресурсах оксидов металлов с одной стороны и углерода – с другой.

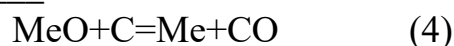
Взаимодействие оксидов металлов и твердого углерода принято называть прямым восстановлением. В результате прямого взаимодействия двух твердофазных реагентов образуется газообразный продукт реакции, но какой? Во всех научных работах (публикациях) принят ответ, что образуется оксид углерода СО по реакции (1):



Такой ответ вытекает опять-таки из позиции ААКМ, что прямое восстановление металлов реализуется через газовую фазу по реакциям:



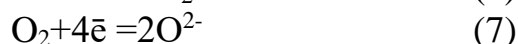
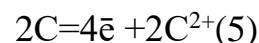
+



Как видно, по реакции (2) восстановление происходит газом СО с образованием СО₂. Затем СО₂ взаимодействует с твердым углеродом по реакции (3) и образует 2СО. Суммирование реакции (2) и (3) дает результат, как будто происходит реакция взаимодействия оксида металла твердым углеродом с образованием СО.

Такая трактовка не имеет никакой научной основы и является логическим предположением. Во-первых, никто, ни на какой аппаратуре не обнаруживал движение газа СО по реакциям (2) и (3). Во-вторых, механизм реакции реализуется не движением молекул газа (молекула подошла и оторвала кислород оксида), а движением и обменом потоков электронов по донорно-акцепторному механизму. В этом отношении сам твердый углерод обладает огромным электронным потенциалом (многократно больше, чем у СО) и не нуждается в газообразном переносчике в виде СО. При по-

лучении энергии извне (нагрев системы) поток электронов может распространяться на значительное расстояние от поверхности донора-углерода к поверхности акцептора-оксида металла по следующей схеме:



Прямое восстановление металлов углеродом не ограничено образованием газообразного продукта только в виде CO по реакции (1). Образование газа, как CO, так и CO₂, зависит от химической прочности оксида металла. Химическая прочность высших оксидов многих металлов многократно ниже, чем низших оксидов. Например, высший оксид железа Fe₂O₃ при повышении температуры до 700–800°C может даже без присутствия восстановительного реагента диссоциировать с образованием свободного кислорода:



И гематитовый концентрат в смеси с твердым углеродом при таком нагреве восстанавливается с выделением, в основном, газа CO₂:



По мере понижения степени окисленности прочность связи кислорода с железом повышается, и, в составе газа – продукта реакции, понижается концентрация CO₂ за счет повышения концентрации CO. Как видно, теоретическое положение на фундаментальных научных основах дает реальную, гибкую формулу прямого восстановления металлов [7, 8] и реализация его на практике позволяет исключить окислительную плавку, открывает революционный подход к восстановительной плавке стали. А существующая трактовка прямого восстановления по реакции (1) неизбежно приводит к двустадийному процессу. Да, в настоящее время существуют попытки по организации восстановительной плавки стали по процессам «Ausmelt», «Romelt», «ITmk3» и др. [9]. Но как показывает практика, все они обречены на выплавку чугуноподобного полупродукта из-за избытка углерода и чрезмерного науглероживания металла. Причина всех подобных неудач, заключается в отсутствии механизма регулирования расхода твердого углерода на прямое восстановление металлов [10]. Только детерминированный метод прямого восстановления металла углеродом открывает путь к исключению процесса науглероживания металла и восстановительной плавки стали. Следуя этому принципу, выполнены серии экспериментальных исследований.

Экспериментальные исследования

Процессы прямого восстановления металлов твердым углеродом и восстановительной плавки стали в вышеописанном контексте апробированы в экспериментальных исследованиях, с целью эффективной переработки, прежде всего, комплексного железорудного сырья.

На территории Республики Казахстан и Российской Федерации разрабатываются крупные месторождения марганецсодержащих (Каражалское и Абаилское) и ванадийсодержащих (Качканарское и Кусинское) железных руд. Концентраты из этих комплексных руд были использованы в экспериментальных исследованиях. Химические составы использованных компонентов шихты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав использованных компонентов шихты

Наименование компонентов	Химический состав, %												
	Fe	FeO	Mn	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	TiO ₂	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	S	P	C
Каражалский концентрат	62,3	10,2	3,10	-	-	-	4,5	0,62	2,85	0,3	0,04	0,02	-
Абаилский концентрат	62,4	9,32	2,33	-	-	-	5,0	0,61	3,10	0,25	0,03	0,018	-
Качканарский титаномагнетитовый концентрат	60,8	20,0	0,12	0,08	0,59	2,65	4,60	1,75	2,82	1,76	0,006	0,007	-
Древесный уголь*													95,0

*примечание: A^c = 1,34, остальное – летучие.

В качестве углеродсодержащего восстановительного реагента был выбран древесный уголь с содержанием 95% твердого углерода. Задача восстановительной плавки, как было показано выше, заключается в том, чтобы в каждый выбранный железорудный концентрат вводилось такое количество углерода, которое предназначено на полное восстановление железа и примесных легирующих металлов. Это достигается по разработанной методике прямого восстановления металлов с учетом последовательно-фазового превращения их оксидов.

По представленным в таблице 1 химическим составам были определены стехиометрические расходы древесного угля на единицу массы каждого концентрата:

- на Каражалский концентрат – 0,163 гр/гр или кг/кг;
- на Абаилский концентрат – 0,162 гр/гр или кг/кг;
- на Качканарский концентрат – 0,147 гр/гр или кг/кг.

В качестве флюса для шлакообразования использовалась обожженная известь с содержанием CaO=92,0%, расход которой составил для перечисленных выше концентратов 0,059 гр/гр; 0,065 гр/гр; 0,041 гр/гр соответственно.

В результате ведения указанных расходов древесного угля и извести в концентрат массой 1 кг были получены подготовленные образцы шихты на основе Каражалского (ш1), Абаилского(ш2) и Качканарского (ш3) концентратов следующей массы:

$$g_{ш1}=1+0,163+0,059=1,222 \text{ кг};$$

$$g_{ш2}=1+0,162+0,065=1,227 \text{ кг};$$

$$g_{шз}=1+0,147+0,041=1,188 \text{ кг.}$$

Подготовленные образцы шихты являются офлюсованными и углеродсодержащими. Подготовленные образцы шихты затем перемешивались и измельчались до фракции менее 1,0 мм, что обеспечивает высокий коэффициент реакционно-контактной поверхности (РКП), который является определяющим фактором высокой скорости протекания твердофазных реакций.

Следующим этапом подготовки шихты является ее окускование или брикетирование. В качестве связующего был использован водный раствор нитроцеллюлозного лака. Полученные на тарельчатом лабораторном грануляторе окатыши фракции 8,0–20,0 мм далее сушили при 450°C в сушильной камере. Таким образом, были получены окускованные рудоугольные окатыши. Сравнение их с оксидными окускованными окатышами показывает огромное технологическое преимущество первых. В рудоугольных окатышах содержатся все необходимые компоненты для автономного протекания процессов прямого восстановления металлов в кинетическом режиме. Оксидные окускованные окатыши нуждаются в подводе извне ГВГ, и восстановление железа в них протекает в топохимическом режиме с многократно меньшей скоростью и многократно высоким выбросом отработанного газа.

Высушенные рудоугольные окатыши навеской по 200 г. были введены в специально подготовленную огнеупорную ячейку, которую вместе с содержимым далее устанавливали в реакционную зону трубчатой печи СУОЛ-044 12 М. Температуру в реакционной зоне повышали со скоростью 10°C/мин до 1000–1050°C, при которой выдерживали 25–30 мин. При достижении 580°C наблюдали начало выделения из ячейки газа, количество и состав которого непрерывно фиксировали.

Выделяющийся газ, как и ожидалось, состоял из двух компонентов – CO₂, CO. При этом отмечено, что концентрация CO₂ в газе имеет два экстремума: первый в начальный период, когда прямому восстановлению подвергаются высшие оксиды железа и второй – когда восстанавливаются низшие оксиды, но при высокой температуре.

Металлизация рудоугольных окатышей завершается полным прекращением выделения газа и достижением степени восстановления железа $R_{Fe}=0,95–0,98$. Химический состав полученных образцов металлизированного продукта представлен в табл. 2.

Как видно, из таблицы 2 железо восстановилось со степенью $R_{Fe} = 0,98$, марганец и ванадий при температуре 1050°C практически не восстановились, остались в виде низших оксидов MnO и V₂O₃.

Вместе с тем, в металлизированном продукте остался избыток углерода, предназначенный как раз для восстановления остаточных оксидов металлов.

Поскольку металлизированный продукт подвергается плавке, при повышении температуры до 1550–1600°C неизбежно происходит восстановле-

ние до металлического состояния марганца, ванадия, а также частично кремния и титана.

Таблица 2

Химический состав металлизированного продукта

Наименование металлизированного продукта	Химический состав, %													
	Fe	Fe _{мет}	FeO	MnO	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	C
Из Каражалского концентрата	76,12	75,6	-	3,73	-	-	-	5,52	3,48	6,71	0,37	0,04	0,026	1,1
Из Абаилского концентрата	76,80	75,8	-	2,80	-	-	-	6,20	3,80	7,40	0,32	0,035	0,022	1,0
Из Качканарский титаномагнетитовый концентрат	76,2	74,68	1,95	0,194	0,1	0,73	3,31	5,95	3,6	2,20	2,2	0,01	0,008	0,45

Образцы металлизированных продуктов по 150 г в огнеупорных тиглях по порядку были установлены в реакционную зону плавильной печи Таммана, в которой температуру повышали со скоростью 20 °С/мин., защищая поверхность тигля продувкой очищенного аргона. При 1500–1550°С наблюдали образование расплава. После 20-минутной выдержки расплав вылили в противень и, после остывания, отделили металл от шлака. Анализ полученных образцов металла представлен в табл. 3.

Таблица 3

Образцы полученных металлов

Металл	Химический состав, %								
	[C]	[Si]	[Mn]	[Cr]	[V]	[Ti]	[S]	[P]	ост. Fe
Опыт №1	0,44	0,25	1,91	–	–	–	0,02	0,03	–
Опыт №2	0,48	0,30	2,26	–	–	–	0,028	0,020	–
Опыт №3	0,42	–	0,146	0,07	0,55	0,6	0,013	0,01	–

Как видно из анализа, во всех образцах слитков преодолено науглероживание металла, концентрация углерода находится в пределах 0,45–0,52%. Легирующие металлы – марганец и ванадий восстановлены со степенью $R_{Mn}=0,75–0,8$; $R_V=0,83–0,85$, соответственно, благодаря чему выплавлена природнолегирующая сталь. Частичное восстановление кремния и титана положительно влияет на качество стали. Особенность природнолегирующей стали, полученной восстановительной плавкой заключается в том, что в его составе отсутствуют оксидные включения, как в «сырой» стали, выплавляемой в конвертерах окислительной плавкой. Регулирование концентрации легирующих металлов по формированию состава шихты на входе, практически исключает использование ферросплавов. Такая технология и является революционной, имеет перспективу развития.

Библиографический список

1. Курунов, И. Ф. Состояние и перспективы бездомной металлургии железа / И.Ф. Курунов, Н.А.Савчук. – М.:Черметинформация, 2002. – 198 с.

2. Курунов, И. Ф. Состояние и тенденции развития металлургии железа в мире в свете вызовов XXI века // Металлургия чугуна – вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2017. – С. 10–20.
3. Чуфаров, Г. И. Адсорбционно-каталитическая теория восстановления окислов металлов / Г. И. Чуфаров, Е. П. Татиевская // Проблемы металлургии. – М.: АН СССР, 1956. – С. 21–32.
4. Вторичные материальные ресурсы черной металлургии: Справочник в 2-х т. / под ред. Л. А. Смирнова. – М.: Экономика, 1986.
5. Леонтьев, Л. И. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л. И. Леонтьев, Н. А. Ватолин, С. В. Шаврин, Н. С. Шумаков. – М.: Металлургия, 1997. – 432 с.
6. Смирнов, Л. А. Металлургическая переработка ванадийсодержащих титаномагнетитов / Л. А. Смирнов, Ю. А. Дерябин, С. В. Шаврин. – Челябинск: Металлургия, 1990. – 256 с.
7. Тлеугабулов, С. М. Диссоциационно-адсорбционный механизм и кинетика твердофазного восстановления железа углеродом / С. М. Тлеугабулов // Сталь. – 1991. – №1. – С. 15–18.
8. Тлеугабулов, С. М. Теория металлургических процессов: учебное пособие для вузов / С. М. Тлеугабулов. – Алматы: НИЦ «Гылым», 2007. – 351 с.
9. Юсфин, Ю. С. Металлургия железа: учебник для вузов / Ю. С. Юсфин, Н. Ф. Пашков. – М.: Академкнига, 2007. – 464 с.
10. Тлеугабулов, С. М. Детерминированное управление окислительно-восстановительными процессами доменной плавки / С. М. Тлеугабулов, Б. С. Тлеугабулов, С. Б. Абииков // Сталь. – 2017. – №2. – С. 10–14.

Разработка регистратора температуры для металлургического эксперимента

Трекин Г. Е., канд. техн. наук, доц.
Шевченко О. И., д-р техн. наук
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

В данной работе поставлена задача разработать, изготовить и испытать регистратор температуры для проведения металлургического эксперимента. Поставленная задача решалась проведением литературного обзора по данной тематике, выбором наиболее простого в программировании и доступного микроконтроллера, а также аналого-цифрового преобразователя температуры, программировании микроконтроллера по образцам опубликованным разработчиками на языке C++, сборкой, наладкой и опробованием в работе при проведении металлургического эксперимента по термообработке углеродистых сталей в лабораторной печи. Разработанное устройство позволяет наблюдать текущую температуру, измеряемую хромель - алюмелевой термопарой, и записывать термический цикл на SD – карту в текстовом файле в координатах время – температура. При минимальной емкости SD – карты возможна запись термического цикла в течении двух недель. Для удобства работы разработанное устройство снабжено батарейным блоком питания, что делает его работу автономной. Полученные данные могут быть обработаны большинством математических пакетов (EXCEL, Mathcad) для получения графиков, математической фильтрации помех или точного расчета параметров термического воздействия. Разработанный прибор обладает незначительной стоимостью, которая составляет около четырнадцати долларов, что делает его доступным даже для студентов.

Ключевые слова: температура, измерение температуры, термопара, термический цикл, микроконтроллеры, металлургический эксперимент.

На современном уровне развития электроники появляется возможность конструировать простые устройства с достаточно высокими характеристиками. Для проведения исследовательских и лабораторных работ часто необходимо производить запись цикла нагрев – охлаждение, в интервале температур от 0 до 1300 °С, с помощью термопары, при этом должна быть возможность наблюдать мгновенное значение температуры.

Самым дешевым и простым в программировании вариантом является семейство контроллеров Arduino, к которому выпускается большое количество совместимых преобразователей сигналов от различных датчиков. Для нашей задачи наиболее совершенным является аналогово-цифровой преобразователь на базе микросхемы MAX 31855 от компании Adafruit. Запись термического цикла удобно производить на SD-карту, поэтому использовалась соответствующая плата совместимая с выбранным нами микроконтроллером Arduino UNO. Для индикации температуры использовали 4-х значный LED-дисплей Catalex. Питание от батарей «Крона» или блока питания постоянного тока на 9 вольт с разъемом подходящим для микроконтроллера.

Схемы соединения, библиотеки и примеры скетчей (программ) для преобразователя температуры, SD-карты и дисплея были взяты с сайтов производителей, продавцов или любителей [1-3]. В результате была составлена схема, показанная на рис. 1.

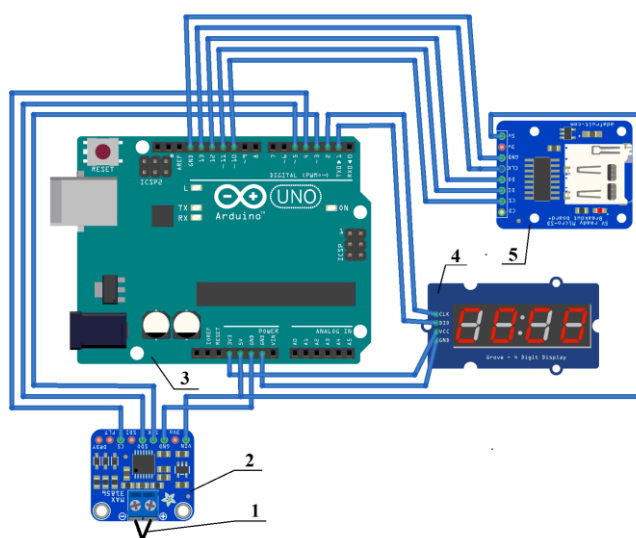


Рис. 1. Схема соединения компонентов регистратора температуры
1 – термопара; 2 – аналогово-цифровой преобразователь на базе микросхемы MAX 31855; 3 – микроконтроллер Arduino UNO; 4 – LED-дисплей; 5 – плата с SD-картой. Изображение подготовлено с помощью программы Fritzing

Разработанная программа (скетч) предусматривает запись значений температуры с максимально возможной частотой (6 Гц), запись в текстовый

файл и вывод усредненного значения температуры на дисплей один раз в секунду. Все компоненты регистратора и держатель батарейки были смонтированы на листе текстолита.

Испытания, разработанного и изготовленного устройства, производили в ходе эксперимента, по проведению термической обработки образцов углеродистой стали. Нагрев производился в печи ПКЛ-1.1.0-М2. Образец нагревали до температур 200–900 °С выдерживали в печи около одного часа и охлаждали в ведре с холодной водой. Результаты измерения одного из образцов приведены на рис. 2.

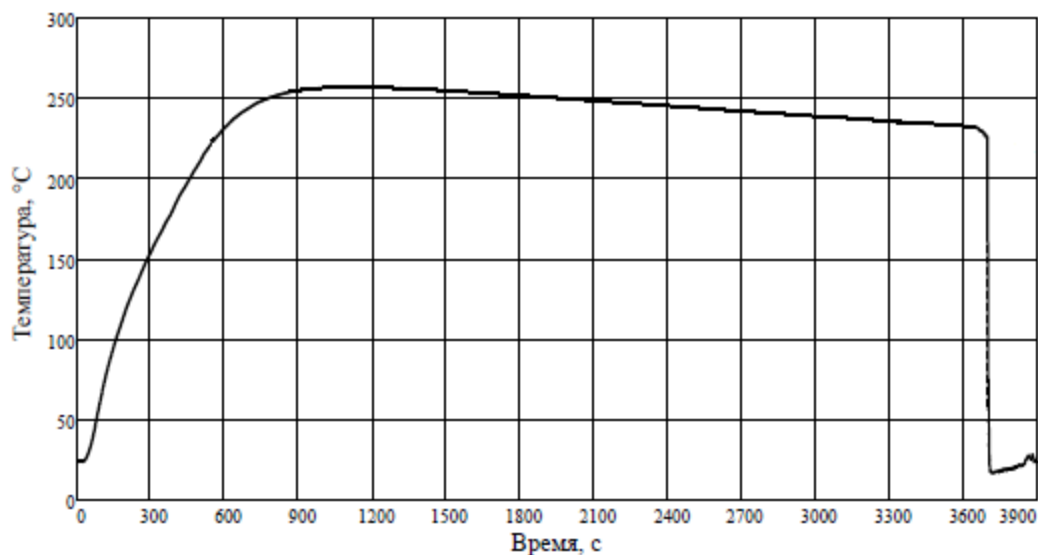


Рис. 2. Цикл термической обработки, зафиксированный разработанным регистратором температуры

Полученные термические циклы, доступны для обработки в программах EXCEL и Mathcad.

Если для изготовления разработанного регистратора температуры использовать китайские компоненты, то их стоимость составляет около 900 рублей.

Таким образом, разработан, изготовлен и испытан автономный регистратор температуры, который может быть использован для исследований, лабораторных работ, отличающийся доступностью по цене и обладающий, достаточно высокими, техническими характеристиками.

Библиографический список

1. <https://www.adafruit.com/product/29>.
2. <https://www.freeduino/arduino/SD-sheld.html>.
3. <https://www.arduino.on.kg/show/221>.

Молекулярная структура жидкого стекла

Фирстов А. П., канд. техн. наук, доц.
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Знание природы вещества помогает в расчетах при нахождении зависимостей между основными свойствами жидкого стекла.

Ключевые слова: структура, молекула, жидкое стекло.

Изучая свойства растворов щелочных силикатов, исследователи не всегда приходят к единому мнению. Так, авторы [1,2,3] натриевое жидкое стекло в сильнощелочной среде ($pH > 10,8$) относят к коллоидным структурам, подтверждая это присутствием «конуса Тиндаля» и аномально высокой вязкостью раствора. Другие авторы считают [4,5,6,7], что растворы щелочных силикатов представляют собой истинный раствор в виде молекул с гидратной оболочкой, либо в виде отдельных молекул.

В зависимости от количественного отношения оксидов натрия и кремния и величины pH авторы [7,8,9] выделяют три вида соединений: мета-, ди- и ортосиликат натрия (Na_2SiO_3 , $Na_2Si_2O_5$, Na_4SiO_4), где метасиликат натрия присутствует при $pH > 12,0$, ди-силикат – при $pH 13,6 \div 10,9$, а ортосиликат натрия в интервале $pH 10,8 \div 12,0$ [9,10].

Целью данной работы является попытка внести ясность в структуру натриевых щелочных силикатов, применяемых в литейном производстве. Информация о структуре жидкого стекла будет необходима для расчетов зависимостей между основными свойствами жидкого стекла.

В общем виде химическую формулу натриевого растворимого стекла можно записать как $Na_2O \cdot nSiO_2 \cdot aq$, где n – силикатный модуль, показывающий число молекул кремнезема на одну молекулу оксида натрия.

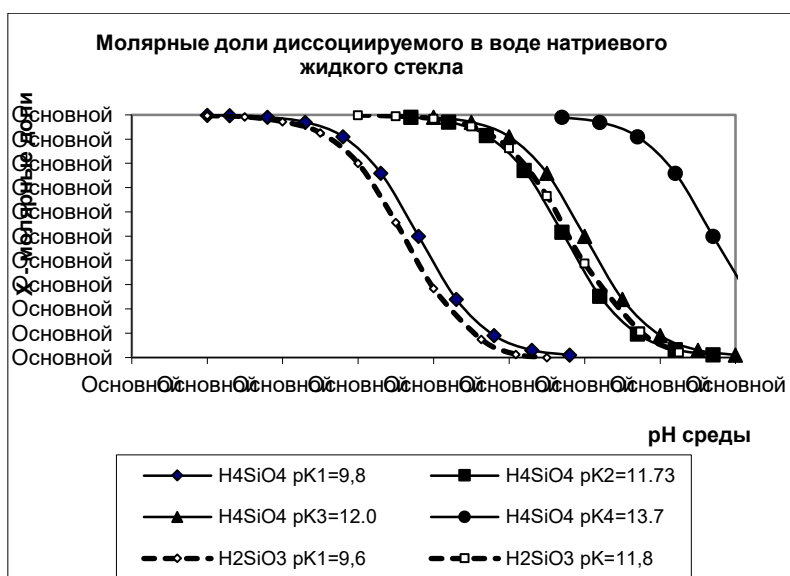
Сделав допущение, что раствор жидкого стекла является истинным раствором и в качестве элементарной частицы в своем составе имеет молекулы моно- и ортокремниевой кислоты, найдем молярные доли участников диссоциации по формуле

$$X_{\text{кислоты}} = \frac{1}{1 + 10^{pK_n - pH}}, \quad (1)$$

где pK_n – ступенчатые константы диссоциации ортокремниевой и метакремниевой кислоты; для H_4SiO_4 , равные $pK_1 = 9,8$ и $pK_2 = 11,73$, $pK_3 = 12,0$ и $pK_4 = 4,68 \cdot 10^{-11}$ ($25^\circ C$), 13,7, и для Na_2SiO_3 равные $pK_1 = 9,6$ и $pK_2 = 11,8$ соответственно;

pH – задаваемое значение среды.

Меняя ступенчатую константу диссоциации, находим молярные доли всех компонентов системы:



Анализируя диаграмму молярных долей видно, что в области существования истинного раствора жидкого стекла ($pH > 10,8$) могут существовать обе формы кремниевой кислоты. Правомерность существования устойчивой области раствора жидкого стекла (истинного раствора) можно найти из следующих выражений. Растворы щелочных силикатов обладают очень высокой буферной емкостью, и концентрацию аниона слабой кислоты в буферном растворе можно приравнять к концентрации соли, то есть $(H_2SiO_4)^{2-} = C_s$, а общую концентрацию слабой кислоты – к ее равновесной концентрации, то есть $(H_4SiO_4) = C_A$ – это для ортокремниевой кислоты, и, $(SiO_3^{2-}) = C_s$, $(H_2SiO_3) = C_A$ – это для метакремниевой [11]. Тогда константа диссоциации будет равна

$$[H^+] = K_{(H_2SiO_4)^{2-}} \frac{C_A}{C_S}, \quad (2)$$

преобразуя уравнение (2), находим

$$pH = 7 + \frac{1}{2} pK_{(H_2SiO_4)^{2-}} + \lg \frac{C_S}{C_A} + \frac{1}{2} C_{(H_4SiO_4)}. \quad (3)$$

Выполненные результаты расчета представлены в таблице. Данные хорошо согласуются с результатами исследований, проведенными на рН-метре ЛПУ-01.

Таблица

Расчетные данные модуля и рН среды

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Модуль	3,0	2,66	2,56	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0	1,8
рН	11,17 - 11,23	11,27 - 11,32	11,29 - 11,35	11,34 - 11,39	11,37 - 11,42	11,41 - 11,46	11,44 - 11,49	11,47 - 11,51	12,91 - 13,23
Интервальные значения рН среды обусловлены различной концентрацией натриевого жидкого стекла $C(H_4SiO_4)$.									

Данный расчет pH среды применим для натриевого жидкого стекла с модулем выше двух. При меньшем модуле возникает избыток Na_2O над SiO_2 , приводящий к резкому повышению щелочности раствора (10-й столбец таблицы), и расчет пойдет по формуле

$$pH = C_{\text{NaOH}} \quad (4)$$

где C_{NaOH} – доля концентрации несвязанного Na_2O .

По полученным данным pH среды устойчивой области натриевых жидких стекол находится в интервале от 11,0 до 11,5. Дальнейшее снижение pH среды приводит к неустойчивости системы и, как следствие, образованию коллоидов.

Попробовать исключить одну из форм кремниевой кислоты возможно рассмотрев строение атома кремния и образующихся молекул мета- и орто-кремниевых кислот.

Упрощенно химическую формулу жидкого стекла представляют в виде Na_2SiO_3 или $\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$. Но в такой формуле подразумевается связывание одного атома кислорода с кремнием двойной связью, что, в свою очередь, маловероятно. Атом кремния не может образовывать двойные σ - π -связи с элементами второго периода из-за слишком большого размера атома кремния, препятствующего эффективному перекрыванию $2p$ - $3p$ -орбиталей. Также, атом кремния имеет свободную d -орбиталь, которая может принимать неподеленную пару электронов атома кислорода, находящуюся в молекуле воды. Образующаяся, таким образом, донорно-акцепторная связь слабее ковалентных связей и компенсация связи идет за счет перераспределения двойной связи с получением 4 равномерных валентностей на атоме кремния, образуя тетраэдр SiO_4 , т. е. в основе кремнекислородного тетраэдра имеет место sp^3 -гибридизация (рис. 1), с координационным числом, равным 4 [12].

Из этого следует, что пространственно энергетически выгодно существование молекулы в растворах щелочных силикатов не в форме Na_2SiO_3 , а в форме $\text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4$.

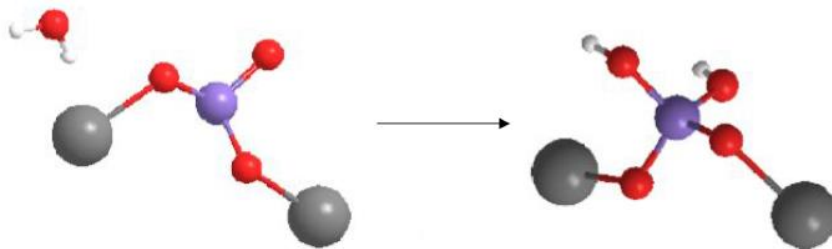


Рисунок 1. Пространственное отображение структур молекул в трехмерном виде: переход молекулы Na_2SiO_3 и H_2O в молекулу $\text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4$

Кроме того, молекула жидкого стекла имеет вокруг себя координационную сферу, состоящую из 8 молекул воды. Это молекулы, входящие в

состав координационной сферы иона натрия или связанные водной связью с кремнекислородным атомом, создающие гидратную оболочку [6]. Таким образом, водный раствор натриевого жидкого стекла должен иметь формулу $\text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$).

Поскольку данный щелочной силикат натрия - это соединение, в котором ковалентная составляющая существенна по своей силе, а полярность воды и электростатическое притяжение «свободного» оксида кремния малы, то это позволяет рассматривать элементарной частицей в водном растворе силиката натрия, в обменных реакциях с кислотами, как дигидросиликат натрия ($\text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4$), молекулярный вес которого равен 140 углеродных единиц. Таким образом, для расчетов концентраций щелочных силикатов нужно брать полное процентное содержание оксида натрия (Na_2O) и равное ему процентное содержание оксида кремния (SiO_2). Оставшийся (избыточный) оксид кремния остается в растворе, т.е. в виде взвешенного или «свободного» кремнезема, давая «конус Тиндаля» и аномально высокую вязкость раствора.

Исходя из выше изложенного, выходит, что в сильнощелочной области в большей степени будет существовать только один кислотный остаток, это $(\text{H}_2\text{SiO}_4)^{2-}$, и принятое допущение о молекулярном составе натриевых жидких стекол $\text{Na}_2\text{H}_2\text{SiO}_4$ правомерно.

Библиографический список

1. Тагер А.А. Растворы высокомолекулярных соединений. – М. : Госхимиздат, 1951. – 208 с.
2. Harman H.C. Naturforsch, 1974, 29B, 7/8. p. 495-499.
3. Пасынский А.Г. Коллоидная химия / под ред. В. А. Каргина. – М. : Высш. шк., 1959. – 266 с.
4. Матвеев М.А., Зосин А.П., Гуревич Б.И. Об оптимальном модуле жидкого стекла для производства высокопрочных вяжущих. Химия и технология вяжущих веществ : Комплексное использование сырья Кольского полуострова. – Л., 1968. – С. 36–44.
5. Жуковский С.С. Прочность литейной формы. – М. : Машиностроение, 1989. – 285 с.
6. Корнев В.И., Данилов В.В. Растворимое и жидкое стекло. – СПб. : Стройиздат, 1996. – 216 с.
7. Айлер Р.К. Химия кремнезема. Т. 2. – М. : Мир, 1982. – С. 416.
8. Карякина М.И. Испытание лакокрасочных материалов и покрытий. – М. : Химия, 1988. – 52 с.
9. Айлер Р.К. Коллоидная химия кремнезема и силикагов. – М. : Госстройиздат, 1959. – 287 с.
10. Волков, А.И., Жарский, И.М. Большой химический справочник / А.И. Волков, И.М. Жарский. – Минск : Совр. шк., 2005. – 608 с.
11. Крешков А.П. Основы аналитической химии. Т. 3. – М. : Химия, 1970. – 473 с.
12. Сычев М.М. Неорганические клеи. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1986. – 152 с.

Приемы повышения стойкости футеровки агрегатов ковшовой обработки стали

Шешуков О. Ю., д-р техн. наук, проф.
ИМЕТ УрО РАН, УрФУ, г. Екатеринбург

Некрасов И. В., канд. тех. наук
ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург

Метелкин А. А., канд. тех. наук, доц.
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Коротков Ю. Н.
Компания DufrescoSA, г. Москва

Рассмотрены технологические приемы повышения стойкости футеровки агрегатов ковшовой обработки стали. Найден состав шлака, наводимого в агрегате «ковш-печь», который мало агрессивен по отношению к футеровке и обладает достаточными рафинировочными свойствами. Показаны условия образования защитного гарнисажа на поверхности футеровки.

Ключевые слова: Ковшевой шлак, футеровка, защитный гарнисаж.

Повышение стойкости футеровки металлургических агрегатов – одна из основных задач в направлении снижения себестоимости металла [1].

На стойкость огнеупорной футеровки агрегатов внепечной обработки стали (сталеразливочный ковш и вакуум-камера) влияют различные факторы, которые условно можно разделить на три типа [2, 3]:

- конструктивные, т. е. конструкция как самого агрегата, так и схема футеровки;
- технологические, т. е. физико-химические свойства шлаков, наводимых на агрегате «ковш-печь» (АКП);
- физико-химические свойства огнеупорных изделий.

В работе [4] был проведен анализ всех трех факторов. Анализ литературных источников показал, что вопрос качества огнеупорных материалов для агрегатов ковшовой обработки стали изучен достаточно и в футеровке данных агрегатов используются изделия с оптимальными физико-химическими свойствами. Дальнейшее повышение качества огнеупоров, и, как следствие, увеличение стойкости футеровки, приводит к экспоненциальному росту стоимости огнеупорных изделий, что, на практике, экономически нецелесообразно.

Конструктивные факторы для каждого предприятия индивидуальны. Повышать стойкость футеровки сталеразливочного ковша за счет увеличения толщины футеровки нецелесообразно, т.к. это приводит к уменьшению емкости сталеразливочного ковша и усложнению технологии выплавки стали. Конструктивные факторы по повышению стойкости футеровки вакуум-камер в условиях конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК» были рассмотрены в источниках [4, 5].

Влиять на технологические факторы затруднительно, т. к. основная цель металлургии – это выплавка качественного металла. Однако существенные затраты на огнеупорные материалы показывают необходимость

более сложного, комплексного подхода к проблеме стойкости огнеупоров – подбора и оптимизации условий их эксплуатации.

Анализ износа футеровки в зависимости от состава шлака, используемого для обработки металла, показал, что при различном содержании MgO в шлаке изменяется и скорость износа огнеупорных изделий. Из данных, представленных на рисунке 1 видно, что минимальный износ наблюдался в сталеразливочных ковшах, в которых содержание MgO в шлаке находилось в интервале от 7,5 до 9,0 %.

По результатам расчетов, выполненных с использованием полимерной модели, разработанной еще в УПИ им. С.М. Кирова и доработанной авторами данного исследования, показано, что растворимость оксида магния в шлаке, в условиях участка внепечной обработки стали (ВОС) конвертерного цеха ОАО «ЕВРАЗ НТМК», составляет от 8,50 до 9,05 %, т. е. минимальный износ наблюдался на тех агрегатах участка ВОС, при обработке сталей в которых использовались шлаки, насыщенные по содержанию MgO.

Растворимость MgO в гомогенной составляющей шлака находится в определенной области и имеет границы, которые зависят от содержания CaO, SiO₂ и Al₂O₃ в составе шлака. Для успешного проведения рафинирующих процессов необходимо высокое содержание CaO в шлаке. Поэтому рассмотрели изменение растворимости MgO в гомогенной составляющей шлака в зависимости от различного содержания CaO. На рис. 2 представлены границы растворимости MgO в шлаке в зависимости от содержания оксидов CaO, SiO₂, Al₂O₃.

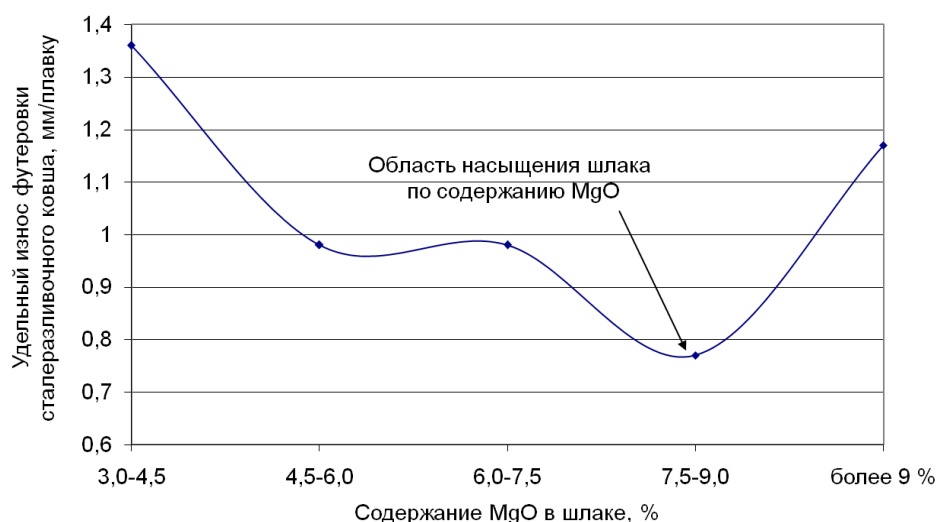


Рисунок 1 – Зависимость износа футеровки сталеразливочного ковша от общего содержания MgO в шлаке

Из данных, представленных на рис. 2 видно, что при замене SiO₂ на Al₂O₃ в гомогенной составляющей шлака, растворимость MgO в шлаке снижается и, как следствие будет снижаться агрессивность шлака к футе-

ровке металлургических агрегатов. Поэтому рационально снижать вязкость шлака вводом в шлак глиноземсодержащих флюсов, а не снижением его основности.

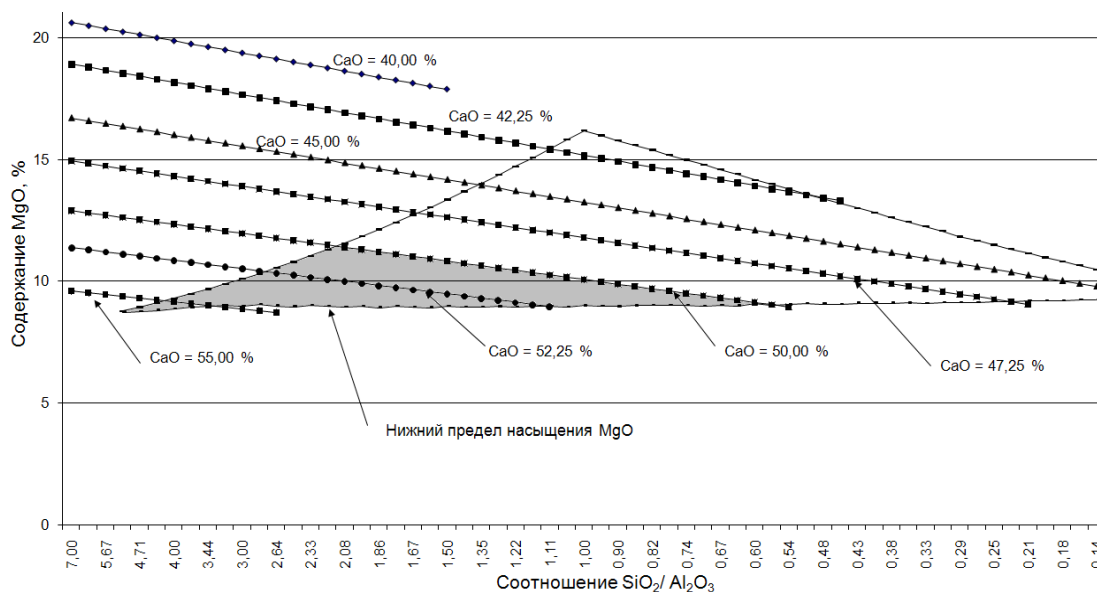


Рисунок 2 – Область рациональных содержаний CaO, Al₂O₃, SiO₂ и MgO в гомогенной фазе сталеплавильного шлака

Возможность образования защитного покрытия зависит от свойств как самого гарнисажа, так и от свойств применяемых огнеупорных изделий. Наиболее износоустойчивыми минералами огнеупорных изделий, применяемых в футеровке стальной ванны и вакуум-камеры, являются шпинели MgO·Al₂O₃ и MgO·Cr₂O₃, поэтому целесообразно рассмотреть возможность выделения из шлакового расплава шпинели MgO·Al₂O₃. Исследования показали, что для образования защитного гарнисажа, содержащего шпинель, необходимо повышать содержание в шлаке MgO до предела насыщения и Al₂O₃ более 15 %.

С целью проведения рафинировочных процессов на АКП наводят высокоосновные, жидкоподвижные шлаки. Для растворения CaO необходимо ввести добавки, которые снизят температуру шлаковой смеси, например CaF₂, керамзит или материалы, содержащие оксид алюминия.

Плавленый шпат широко применяется в сталеплавильном производстве как эффективный разжижитель шлака. Однако применение плавленого шпата имеет ряд известных недостатков [6].

На металлургических предприятиях в качестве кремнийсодержащей добавки используют керамзит или шамот. Однако, использование такого типа материалов для проведения рафинирующих процессов не целесообразно, поэтому необходимо разрабатывать разжижающие материалы на основе глинозема [6].

Был проведен анализ влияния на шлакообразование, рафинирующие свойства шлаков и проведены промышленные испытания различных гли-

ноземсодержащих материалов, которые вводили на АКП взамен разжижающей добавки на основе кремнезема.

Были рассчитаны варианты изменения состава шлака и его свойств при замене добавки на основе кремнезема на глиноземсодержащую добавку «РАНТАЛ 50 ГР» и/или глиноземсодержащие брикеты производства ОООИ «РОИС». Показано, что наиболее целесообразно полностью заменить ОКД на глиноземсодержащие материалы.

Проведенные испытания по использованию глиноземсодержащих материалов в качестве разжижителя шлака при ковшовой обработке стали на АКП показали, что:

- степень десульфурации на опытных плавках выше, чем на сравнительных (42,9 % против 35,0 %);
- удельный износ огнеупоров впускного патрубка вакуум-камер снизился с 2,58 до 1,60 мм/пл., в среднем на 37,9 %;
- средняя стойкость футеровки вакуум-камер повысилась на 39,4 %, с 69,8 до 97,3 пл.
- прирост в стойкости футеровки стальной составил 8 %;

На основании проведенных испытаний установили норму расхода глиноземсодержащих материалов на АКП в количестве 1,8–2,0 кг/т стали (273–304 кг/пл.) взамен ОКД.

Библиографический список

1. Филатов, С. В., Вислогузова, Э. А., Фомичев, М.С. Шкляев, А.В. Повышение стойкости футеровок металлургических агрегатов эффективный путь снижения удельных затрат на огнеупорные материалы. «ЕВРАЗ НТМК». Труды VI международной научно-практической конференции с элементами научной школы для молодежи посвященной 80-летию ММК. «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология». 15-20 октября 2012 г. Москва.
2. Шешуков, О. Ю. Увеличение времени эксплуатации и надежности работы футеровки вакуум – камер [Текст] / О. Ю. Шешуков, С. В. Виноградов, Э. А. Вислогузова, В. В. Левчук, А. С. Ткачев, А. А. Метелкин, И. В. Некрасов // Сталь. – 2012. – № 1.
3. Метелкин, А. А. Способы повышения стойкости футеровки циркуляционных вакууматоров в «ЕВРАЗ НТМК» [Текст] / А. А. Метелкин, О. Ю. Шешуков, И. В. Некрасов, Э. А. Вислогузова, В. М. Кулик, В. В. Левчук // Сталь. – 2013. – № 9.
4. Метелкин, А. А. Повышение износоустойчивости футеровки агрегатов ковшовой обработки стали [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.16.02 : защищена 23.09.14 : утв. 22.01.15 / Метелкин Анатолий Алексеевич. – Магнитогорск. – 2014. – 184 с.
5. Метелкин, А. А. Способы повышения стойкости футеровки циркуляционных вакууматоров в условиях «ЕВРАЗ НТМК» [Текст] / А. А. Метелкин, О. Ю. Шешуков, И. В. Некрасов, Э. А. Вислогузова, В. М. Кулик, В. В. Левчук // Сталь. – 2013. – № 9. – С. 49 – 52.
6. Метелкин, А. А. Повышение стойкости футеровки агрегатов внепечной обработки стали /А.А. Метелкин, О.Ю. Шешуков, И.В. Некрасов, О.И. Шевченко // Министерство образования и науки РФ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2017. – 208 с.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА

К восьмидесятилетию со дня рождения доцента И. А. Толстова

Сафонов Е. Н., д-р.техн. наук
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил
Шумяков В. И., канд. техн. наук
УрФУ, г. Екатеринбург

Настоящая статья содержит подборку воспоминаний о доценте Игоре Александровиче Толстова (25.10.1938–15.08.2014), который внес заметный вклад в развитие учебного процесса и научных исследований в Нижнетагильском технологическом институте (филиале) Уральского политехнического института имени С.М. Кирова.

Ключевые слова: И.А.Толстов; Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского политехнического института имени С.М. Кирова.



Шумяков Валентин Иванович, выпускник каф. ТСП УПИ 1961 г., зам. директора Уральского института сварки.

Игорь Александрович закончил кафедру «Технология сварочного производства» УПИ в 1962 г. Помню его с 1967 года, когда я стал аспирантом профессора М.И. Разикова. В его коллективе в то время, помимо Толстова, были Г.Н. Кочева, В.П. Ильин, Б.А. Кулишенко, А.В. Пряхин. Работая на кафедре научным сотрудником, он в 1964 г. поступил в аспирантуру к профессору Разикову М.И и в 1967 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование автоматической наплавки прессового инструмента». Активно внедрял свои разработки на уральских заводах, вел преподавательскую работу в должности доцента: читал лекции по курсу «Организация и планирование производства», вел общие курсы по сварке для различных специальностей, руководил курсовым и дипломным проектированием. В 1969 г. получил ученое звание доцента. Активно публиковать в печати свои разработки И.А. Толстов начал еще до начала обучения в аспирантуре, и наш общий руководитель М.И. Разиков так дословно отзывался об этом: «...ну и писатель у нас Толстов!», ставил его в пример другим аспирантам. В завершении своей активной научной деятельности в багаже И.А. Толстова были три классических монографии, более 200 научных трудов и публикаций, в т.ч., 42 изобретения и патента.

Несмотря на несколько перспективных предложений по дальнейшей работе (в т.ч., из Института электросварки имени Е.О. Патона на переезд в г. Киев), Игорь Александрович как патриот Урала вернулся на свою родину в Нижний Тагил. В Нижнетагильском филиале Уральского политехнического института (УПИ) имени С.М. Кирова в 1970 г. он приступил к работе в качестве доцента кафедры «Специальное машиностроение», руководил методической группой специальности «Оборудование и технология свароч-

ного производства», которая в 1972 г. начала подготовку и выпуск инженеров-сварщиков по очной форме обучения, наряду с существовавшей очно-заочной. И.А. Толстов приглашал меня читать лекции по теории сварочных процессов в филиале УПИ, где студентом был и его сын Анатолий.

В 1990 г. Игорь Александрович организовал предприятие «Упрочнение» и развернул целый комплекс работ по сварке и наплавке на Нижнетагильском металлургическом комбинате (НТМК). Активно сотрудничал со «Свердловской ассоциацией сварщиков», в которой я был вице-президентом. Мы выполняли совместные работы по упрочнению наплавкой прессового инструмента на заводах цветной металлургии, в Верхнесалдинском металлоперерабатывающем объединении (ВСМПО), оказывали ему помощь в обеспечении поставок дефицитных в то время сварочных материалов.

Игорь был замечательным семьянином, самым первым из моих друзей и знакомых, который приобрел для своего семейства загородный дом в сельской местности – в поселке Быньговский. Мы дружили семьями, и он часто приглашал меня с супругой для отдыха в своем доме, собирать грибы, попариться в баньке. С благодарностью вспоминаю гостеприимство его и верной подруги Тамары.

Секисов Анатолий Сергеевич, закончил Нижнетагильский филиал УПИ в 1970 г., занимал руководящие должности в Управлении главного механика НТМК, в настоящее время – ведущий инженер ООО «Сварочные технологии».

В семидесятых годах двадцатого века в металлургической отрасли осваивалась новейшая технология автовакуумной наплавки релитом (карбидами вольфрама) в мельхиоровой матрице конусов засыпных аппаратов доменных печей. На нашем комбинате по инициативе начальника Лаборатории наплавки Зверева Л.И. и доцента Толстова И.А. ее применили для наплавки малых конусов доменных печей. Обладая высокой износостойкостью, наплавленный слой соответственно трудно поддавался обточке. Для решения этой проблемы Толстов И.А. использовал методы электрохимической и электрофизической обработки. Ответственным исполнителем была преподаватель филиала УПИ М.Н. Семиколенных. После наплавки и обработки срок службы конусов увеличился вдвое, а разработанная технология их упрочнения применялась до вывода из эксплуатации доменных печей с конусными засыпными аппаратами.

В восьмидесятых годах на Криминовском металлургическом комбинате (Болгария) столкнулись с трудностями освоения наплавки быстроизнашивающихся деталей оборудования. Руководство комбината обратилось за помощью к местному Научно-исследовательскому институту (НИИ) и в Министерство черной металлургии СССР. В Болгарском НИИ имелся «Справочник мастера наплавочного участка», изданный еще в шестидесятых годах Толстовым И.А. и его научным руководителем профессором Разиковым М.И., поэтому институт заключил договор с филиалом УПИ

(руководитель доцент Толстов И.А.). Министерство командировало на Кривиковский комбинат меня, в то время начальника Лаборатории сварки и наплавки НТМК. Совместными усилиями в Болгарии были освоены инновационные технологии наплавки ответственных колесных пар для перемещения чаш с жидким шлаком, чугуном и сталью, кернов стрипперных механизмов, деталей засыпных аппаратов доменных печей. Для ускорения обработки твердого наплавленного металла была применена плазменно-механическая обточка. С целью утилизации отходов и уменьшения себестоимости наплавки разработана технология размола и повторного использования шлаковых корок от различных флюсов. Эти сложные работы были выполнены в короткий срок 1987-1990гг. Стойкость наплавленных деталей засыпных аппаратов возросла в два раза, и в полтора раза сократился годовой расход колесных пар. Производительность наплавки кернов, благодаря автоматизации, возросла в пять раз, при улучшении условий труда сварщиков.

Сафонов Евгений Николаевич, закончил Нижнетагильский филиал УПИ в 1977 г., д.т.н., директор Школы магистратуры Нижнетагильского технологического института (филиал) УрФУ.

Мое знакомство с И.А. Толстовым состоялось в 1973 г., когда я был студентом, а Игорь Александрович отвечал за выпуск инженеров по специальности «Оборудование и технология сварочного производства», в том числе и нашей группы – первой группы очной формы обучения этой специальности в филиале. Он преподавал нам специальные дисциплины, проводил беседы о научных и производственных проблемах, стремился пробудить интерес к творческой исследовательской деятельности. При его активном участии в институте работало студенческое научно-техническое общество, где студенты готовили доклады по результатам исследований и выступали с ними на конференциях не только в институте и городе, но и в Свердловске, Перми и других городах СССР. Игорь Александрович организовывал студенческие командировки, в том числе на производственные практики, в город Коммунарск, где мы изучали опыт износостойкой наплавки металлургического оборудования.

В это время на предприятиях Урала внедрялся передовой технологический процесс воздушно-плазменной резки металлов. Поступающее на предприятия новое оборудование зачастую было еще несовершенным, требовало при внедрении доработки и модернизации. В частности, трехфазные выпрямители для питания дуги отличались значительными массой, габаритами и стоимостью. В некоторых литературных источниках удалось найти теоретические положения и расчеты, позволившие заключить, что устойчивого горения дуги можно добиться и от однофазного выпрямителя, массогабаритные и стоимостные характеристики которого существенно ниже. Вдохновленные этими познаниями и напутствием Игоря Александровича, мы – трое студентов четвертого курса (Бронников С.А., Чечик Ю.Э., Сафонов Е.Н.) отправились на двухмесячную производственную практику в город Каменск-Уральский. Там, на заводе по обработке цвет-

ных металлов существовала острая проблема резки цветных сплавов, затвердевших на деталях оборудования электрических плавильных печей после аварийных остановок. Поскольку газокислородной резке эти сплавы не поддаются, было решено использовать воздушно-плазменную резку с помощью самостоятельно изготовленного оборудования. В ходе этой работы мы впервые на собственном опыте убедились, что лучшим критерием научной теории является практика, но все же с честью справились с поставленной задачей, выполнив работоспособный экземпляр установки для ручной воздушно-плазменной резки. Считаю, что опыт самостоятельной научно-производственной деятельности, полученный с легкой руки И.А. Толстова, пригодился мне, а также и многим другим его ученикам, в дальнейшей жизни и работе.

Толстобров А.К. – к.т.н., технический директор НПО «Плазма-НТ»

В начале восьмидесятых годов в сварочном производстве страны получили широкое развитие плазменные процессы. Игорь Александрович не оставил без внимания это перспективное направление. По его инициативе и при его непосредственном руководстве была создана творческая группа молодых ученых и специалистов из Нижнетагильского филиала УПИ, лаборатории износостойких покрытий Института Химии твердого тела Уральского отделения Академии наук СССР (УрО АН СССР) и Лаборатории сварки и наплавки НТМК для развития и внедрения плазменных технологий в Уральском регионе. В этот период на НТМК созданы участки плазменного напыления, вакуумного ионно-плазменного напыления режущего инструмента, плазменной наплавки, резки и опытное производство композиционных порошков. По результатам проведенной научно-исследовательской работы по синтезу композиционных конгломерированных порошков на основе тугоплавких соединений титана в 1991 г. на Кировградском заводе твердых сплавов организован промышленный участок производства таких порошков из отходов производства безвольфрамовых твердых сплавов на основе карбонитрида титана и титана-циркония, предназначенных для нанесения плазменных покрытий методами напыления и наплавки.

Новые покрытия получили промышленное применение при упрочнении деталей топливных насосов газотурбинных двигателей в Пермском агрегатно-конструкторском бюро, тяговых роликов волочильных машин на Камском кабельном заводе, осей звеньев цепей транспортеров, валов насосов и сопел головки парового эжектора коксовой батареи коксохимического производства НТМК, роликов огнеупорного производства НТМК, плунжеров прессавтоматов на Высокогорском механическом заводе и других деталей на предприятиях Уральского региона.

Коротков Владимир Александрович, закончил Нижнетагильский филиал УПИ в 1977 г., д.т.н., профессор НТИ (филиал) УрФУ.

Толстов Игорь Александрович поступил в аспирантуру профессора М.И. Разикова, когда во всем мире развивались исследования износостой-

кости деталей машин. В УПИ тогда под руководством проф. И.Н. Богачева была открыта «Проблемная лаборатория металловедения», в которой разрабатывались износостойкие материалы тогда практически не известных классов сталей: метастабильного аустенита, дисперсионно-упрочняющихся, мартенситно-старееющих. В аспирантуре И. А. Толстов вместе со своим руководителем разработали способы применения новых сталей и сплавов в виде наплавочных материалов и подготовили «Справочник мастера наплавочного участка», который в 1966 г. выпущен в издательстве «Машиностроение».

После защиты кандидатской диссертации Игорь Александрович в 1970 г. переводится в Нижнетагильский филиал УПИ на должность доцента. На новом месте он организует по дневной форме обучение студентов сварочной специальности. Одновременно с группой сотрудников приступает к проведению научно-исследовательских работ с предприятиями Уральского региона по теме «Восстановление и упрочнение быстроизнашивающихся деталей горно-металлургического оборудования».

В начале восьмидесятых годов для Научно-производственного объединения «Уралгеология» методами сварки было достигнуто снижение поломок геологоразведочных труб в условиях направленного бурения. Получены авторские свидетельства, медаль Выставки достижений народного хозяйства СССР, премия для молодых ученых УрО АН СССР. К этому времени у Игоря Александровича накопился перспективный опыт по наплавке импортных прокатных валков из трудносвариваемых высокоуглеродистых сталей. Благодаря этому было открыто госбюджетное финансирование лаборатории черной и цветной металлургии УПИ, ведущие сотрудники которой в 1990 г. были удостоены Государственной премии СССР.

Еще в семидесятых годах Игорь Александрович организовал исследования по освоению поверхностной закалки плазменной дугой, а в середине восьмидесятых на НТМК впервые в отрасли состоялось ее внедрение в производство для упрочнения бандажей рельсопрокатных машин, роликов рольгангов, прокатных валков. В 2002 г. бывшими сотрудниками научной группы Толстова разработана установка для ручной плазменной закалки (УДГЗ-200), которая позволяет закалывать ранее недоступные участки поверхности быстроизнашивающихся деталей. Она прошла сертификацию и стала первой серийной установкой для плазменной закалки. Установка демонстрировалась и в 2008 г. отмечена серебряной медалью на Женевском салоне изобретений и инноваций, ее разработчики удостоены Премии губернатора Свердловской области для молодых ученых.

По исследованиям, организованным И.А. Толстовым, издано пять монографий, защищено пять кандидатских и три докторские диссертации. В учебные планы Нижнетагильского филиала УПИ в 1989 г. включен новый курс «Износостойкость машин». Начиная с 2001 г. проводится серийная (раз в два года) научно-практическая конференция «Сварка. Реновация.

Триботехника», которая собирает представителей организаций и предприятий не только Урала, но и других регионов страны и ближнего зарубежья.

Игорь Александрович оставил о себе достойную память, а его дело продолжают ученики, привлекая к научно исследовательской работе нынешних студентов и выпускников Нижнетагильского технологического института.

Методические основы расчета и проектирования металлорежущих плазмотронов

Анахов С. В., канд. физ.-мат. наук
РГППУ, г. Екатеринбург

Представлены обобщенные авторские результаты по разработке методики расчета и проектирования металлорежущих плазмотронов. Отмечено, что подобная методика должна учитывать газодинамические, электро- и теплофизические факторы дугообразования. Особое внимание при проектировании надо обращать на безопасность плазменных технологий. Предложенная методика включает в себя расчет газодинамических потерь и коэффициента равномерности распределения скоростей по тракту плазмотрона. Результаты газодинамического анализа используются для профилирования газовоздушного тракта плазмотрона с учетом критериев безопасности. Рассмотренная методика применяется для разработки новых плазмотронов, в том числе, использующих технологию узкоструйной плазмы.

Ключевые слова: плазмотрон, проектирование, газодинамика, скорость, газовоздушный тракт, профилирование, газовихревая стабилизация, завихритель, расширительная камера, плазмообразующий газ, плазменная струя, численное моделирование.

Создание новых импортозамещающих технологий – основная задача проектирования плазмотронов для резки металлов. Такая методика должна базироваться на анализе опыта разработки и производства электроплазменного оборудования и учитывать основные факторы и принципы проектирования дуговых плазмотронов постоянного тока (рис.1) [1].

Среди всех подсистем плазмотрона основную роль играет сопловой узел, проектирование которого требует учета газодинамических, электро- и теплофизических факторов дугообразования. Методика его расчета была создана еще в конце прошлого века и в настоящее время является базовой при проектировании большинства современных плазмотронов для резки, опирающихся на однотипные схемы подачи ПОГ. Однако, ее применение в настоящее время требует коррекции, учитывающей новые конструктивные решения и методы исследования.

Среди современных методов исследования преобладают работы по численному моделированию процессов в сопловом узле плазмотронов, проводимые в С.-Пб.ГПУ[2], Новосибирском ГТУ, ИТ и ИФМ СО РАН [3], ИВТ РАН [4] и ряде других институтов. Однако, в упомянутых исследованиях фактически не рассматриваются металлорежущие плазмотроны, а сами решаемые задачи затрагивают узкие проблемы надежности и эф-

фективности работы плазменного оборудования, не позволяя сформулировать системную методику проектного анализа. По этой причине была поставлена задача разработки методики проектирования перспективных конструкций плазматронов для резки металлов, основанной на поиске оптимального профиля газоздушного тракта (ГВТ) плазмотрона. Вносимые при проектировании изменения в конструкцию отдельных участков ГВТ определяют не только функционально значимые параметры плазменной дуги (струи) в сопловом узле плазмотрона, но и влияют на безопасность его работы.



Рисунок 1. Принципы и факторы проектирования в электроплазменных технологиях

Известные методики расчета конструкции ГВТ плазматронов для резки (рис.2) имеют ряд существенных недостатков. Во-первых, она не учитывает неизбежные потери давления, возникающие на предшествующих сопловой камере участках ГВТ (в первую очередь, в завихрителе). Во-вторых, критерии качества плазменной резки требуют соблюдения равномерности распределения скоростей ПОГ по сечению ГВТ в электродуговой камере. В-третьих, конструкции завихрителя и соплового узла существенно влияют на характер акустического излучения плазмотрона – один из важнейших факторов безопасности плазменной технологии, а, следовательно, требует коррекции по акустическим критериям. В-четвертых, данная методика не учитывает последних конструктивных особенностей проектирования плазматронов, работающих по технологии узкоструйной (точной или сжатой) плазмы с применением двухпоточной схемы подачи ПОГ и нескольких вихревых камер.

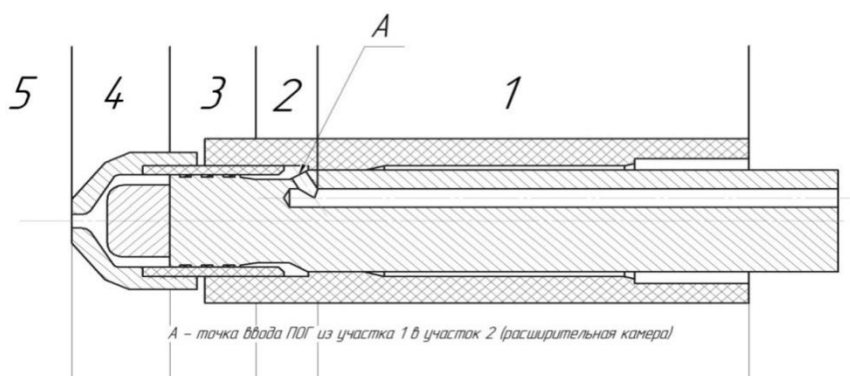


Рисунок 2. Схема газоздушного тракта
однопоточного плазмотрона для резки металлов.

Характеристики участков ГВТ: 1 – ввод ПОГ в плазмотрон, 2 – выравнивание потока газа, 3 – завихритель, 4 – сопловой узел, 5 – выход плазмы

Исследования большинства известных отечественных плазмотронов для воздушно-плазменной резки (ПВР-402, ПМВР, ПМВР-М, ВПР-410, ПЗ-400ВА и др.) показали, что теоретические расчеты газодинамических, электрических и теплофизических параметров плазмотронов следует проводить, учитывая потери давления в ГВТ плазмотронов с одно- и двухпоточными схемами газового распределения. Имеющиеся данные свидетельствуют о характере течения ПОГ в режиме развитой турбулентности ($Re=9000 \div 110000$), а также позволяют оценить влияние отдельных участков ГВТ на потери динамического напора. Основной вклад в известных схемах подачи ПОГ дает завихритель ($\approx 55\%$ инерционных потерь). Общее количество потерь растет с увеличением расхода ПОГ, что накладывает ограничения на предельные значения расходов при заданном давлении газа (мощность нагнетания ПОГ). Необходимо в этой связи добиваться снижения потерь давления по ГВТ конструктивными методами в целях повышения кинетических и энергетических параметров плазменной струи, снижения тепловых потерь в сопловом узле плазмотрона. Скорректированные, с учетом данных расчетов, значения давления можно использовать для определения средних по сечению газодинамических характеристик потока ПОГ, а расчет уточненного значения давления $P_{\text{вых}}$ на выходе из ГВТ плазмотрона позволяет оценить параметры истечения плазменной струи [5], а также использованы и для более точного определения частотных и энергетических характеристик шумоизлучения плазмотронов.

Характерным признаком известной однопоточной конструкции ГВТ плазмотронов для резки является наличие завихрителя и расширительной камеры перед ним (рис.2). Однако, асимметрия подачи ПОГ в расширительную камеру из входной части ГВТ приводит к неравномерности распределения потока на последующих участках ГВТ плазмотрона (рис.3), а, следовательно, влияет на эффективность, качество и надежность плазменной резки. Неравномерность распределения скорости потока по сечению ГВТ плазмотрона было предложено оценивать путем нахождения отноше-

ний скоростей, вычисленных в программной среде COSMOS FloWorks в 4-х симметрично расположенных по сечениям точках, из которых одна находится напротив точки ввода газа в расширительную камеру плазмотрона. Моделирование течения потока газа дает возможность получить характерную картину изменения газодинамических параметров – скорости течения потока ПОГ на отдельных участках ГВТ плазмотрона, давление и плотность распределения газового потока по сечениям каналов плазмотрона [6]. Выполненные расчеты позволяют определить области возмущений потока ПОГ, которые негативно влияют на характер его течения, сопровождаемое появлением вихревых зон, потерей скорости и давления потока ПОГ, наличием неравномерности распределения потока ПОГ по сечению каналов ГВТ плазмотрона. В результате появляется возможность определить участки ГВТ плазмотрона, которые требуют конструктивных изменений (оптимизации) для улучшения условий течения ПОГ.

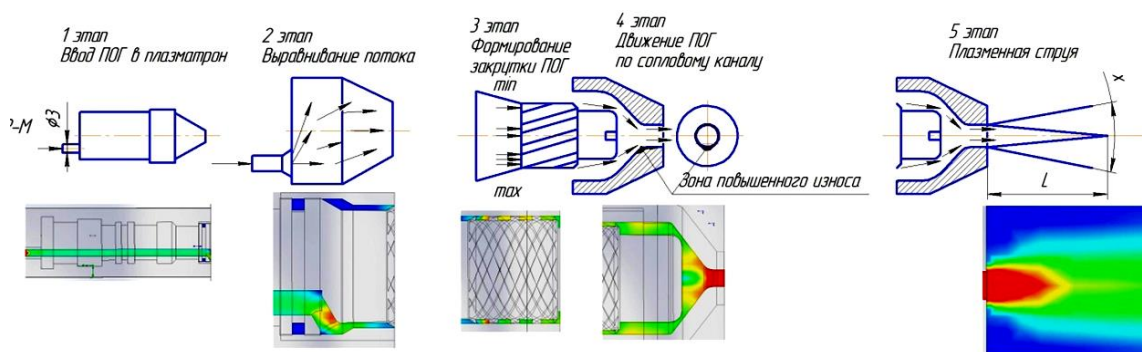


Рисунок 3. Схема работы системы газовихревой стабилизации плазмотронов

По результатам выполненного анализа было предложено модернизировать конструкцию зоны выравнивания потока газа (участок 2 ГВТ – рис.2) плазмотрона путем определения оптимальных размеров расширительной камеры, влияния расположения и конструктивных параметров стенки и сетки на пути течения потока [7]. Кроме того, при оптимизации участка 3 (вихревой камеры) была предложена конструкция завихрителя с шестизаходной резьбой. Был также проведен анализ и оптимизация конструкции ГВТ с симметричной подачей ПОГ в расширительную камеру и 2-мя завихрителями, обеспечивающие существенное увеличение равномерности распределения ПОГ.

Помимо расчетов газодинамических параметров следует, при необходимости, провести гидродинамический анализ трактов жидкостного (водяного) охлаждения плазмотронов, а также анализ системы охлаждения катодного узла. Проведенные расчеты показали, что системы охлаждения большинства известных однопоточных плазмотронов для резки позволяют осуществлять свободную прокачку теплоносителя в заявленных технологических режимах. Расчетным путем были определены параметры эффективного охлаждения катодного узла и показано, что для эффективного

охлаждения сопла достаточно использовать газовихревую систему стабилизации плазменной дуги с максимально допустимыми скоростями подачи ПОГ в сопловой узел из завихрителя. В целях оптимизации конструкции по критериям эффективности и производительности следует также выполнить электрофизический расчет параметров плазменной дуги.

Предложенная методика расчета газодинамических параметров ПОГ должна быть использована и при проектировании плазмотронов с учетом фактора безопасности, так как процессы акустического и оптического излучения существенным образом зависят от конструктивных и технологических особенностей работы плазмотронов. Например, появление дискретных тонов в спектре шума можно объяснить с помощью авторских феноменологических моделей, связанных с механизмом резонансного самовозбуждения турбулентных пульсаций потока ПОГ на собственных частотах газоздушного тракта плазмотрона с последующей передачей энергии звуковых колебаний и их излучением из сопла плазмотрона. Для устранения причин, влияющих на появление дискретных составляющих акустического спектра, необходимо профилирование ГВТ плазмотрона вести в целях снижения степени турбулентности потока ПОГ с минимизацией объемов и площадей проходного сечения в прикатодной области соплового узла плазмотрона с одновременным уменьшением диаметра канала сопла и его длины. Расчет газодинамических параметров истечения плазменной струи следует проводить также с учетом условий, обеспечивающих минимальный уровень излучения широкополосного аэродинамического шума.

При проектировании следует также обратить внимание, что интенсивность излучения плазмотронов в оптическом диапазоне зависит от геометрии плазменной дуги (струи) и может быть снижена за счет ее обжатия и стабилизации. Анализ современных конструкций металлорежущих плазмотронов показывает, что наибольшая степень обжатия достигается в плазмотронах, использующих принцип двойного вихревого обжатия дуги за счет распределения ПОГ на 2 потока (формирующий и стабилизирующий плазменную струю), что позволяет одновременно существенно снизить уровень как оптического, так и акустического излучения.

Эффективное внедрение по критериям безопасности плазмотронов с двухпоточной (двухконтурной) схемой подачи ПОГ заставляет обратить внимание при проектировании на наиболее современную металлорежущую технологию – узкоструйной (сжатой или точной) плазмы (УСП), применяемую рядом зарубежных производителей (Kjellberg, Hypertherm, MesserGreisheim). Данная технология может считаться универсальной, в том числе, и по показателям эффективности и качества, обеспечивая их наилучшие показатели при резке металлов малых и средних толщин.

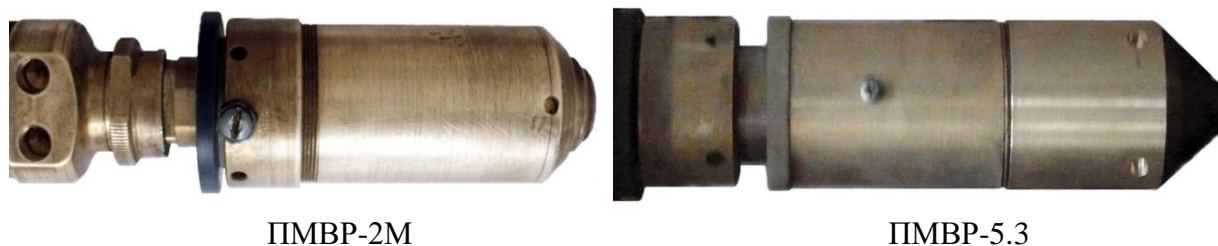


Рисунок 4. Новые плазмотроны для резки металлов

На основе предложенной методики в ООО НПО «Полигон» и ООО «ТЕРУС» разработаны конструкции плазмотронов и их сменных частей (сопел, катодов) для резки и сварки. Для резки металлов больших толщин рекомендованы однопоточные плазмотроны ПМВР-3(2М) с оптимизированным ГВТ, металлов толщиной до 40 мм – плазмотроны серии ПМВР-5 (рис.4), использующие двухпоточную технологию узкоструйной плазмы. Предложены и рассчитаны конкретные конфигурации сопловых узлов – с экспоненциальным, катеноидальным и эквидистантным профилями, а также с соплом Витошинского. Внедрение данных плазмотронов должно способствовать улучшению параметров эффективности, качества и безопасности технологий резки металлов.

Библиографический список

1. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования в электроплазменных и сварочных технологиях: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2014. 144 с.
2. Дресвин С.В., Нгуен Куок Ши, Иванов Д.В. Основы математического моделирования плазмотронов. Ч.3: Уравнения движения плазмы. Методика расчета скорости плазмы в плазмотронах - СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 132 с.
3. Цыдыпов Б.Д. Катодные и прикатодные процессы сильнотоочных плазменных систем. – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2012. 272 с.
4. Корсунов К.А., Калюжный Г.С., Лыштван Е.Ю. Расчет характеристик плазмотрона с помощью уравнения Эленбааса-Геллера // Успехи прикладной физики. 2016, т.4. – №5. – С.461-464.
5. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В., Шакуров С.А. Газодинамические особенности проектирования плазмотронов // Сварочное производство. 2011. – №12. – С. 10–15.
6. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Исследование систем газовой стабилизации плазмотронов // Сварочное производство. 2015. №4. С.20-24.
7. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Газовыхревая стабилизация в плазмотронах: новые решения // Сварочное производство. 2015 №5. С.49-53.

Применение ревитализанта «РВС-ИПИ» для восстановления механических пар трения

Байнов А. А.

ОАО «Святогор НТ», г. Екатеринбург, РФ

Фирстов С. В., канд. техн. наук

УРГУПС, г. Екатеринбург, РФ

В статье рассматриваются вопросы применения ремонтно-восстановительного состава - интеллектуального-поверхностного изоморфа (РВС-ИПИ) на предприятиях различных отраслей промышленности.

Ключевые слова: РВС-технология, поверхности пар трения, износ, ресурс, трибология, триботехнические составы, серпентиниты, минералы, оливины, свойства материалов, присадки, кондиционеры, геоактиваторы, структура фаз металлов, микроструктура, debris слой, эффекты от применения.

Для промышленных предприятий вопрос продления ресурсов трущихся металлических поверхностей в механизмах и машинах является актуальным, а восстановление геометрии узлов трения до номинального состояния в порядке текущей эксплуатации без вывода в капитальный ремонт еще и очень эффективным.

В конце 80-х годов учеными, работающими по заданию ВПК, под руководством проф. Ревнивцева В.И. был разработан принципиально новый метод обработки стальных деталей и целых узлов с использованием направленной полной диффузии, в корне меняющий традиционное понятие ремонта [1]. В основе метода лежит способность триботехнических составов при определенных условиях диффундировать в глубину поверхностного слоя металлов, вызывая упрочнение его дислокаций. Основой этих триботехнических составов на тот момент являлись синтетические порошки оксидов металлов. Это было дорогостоящее и требующее дальнейшего развития решение.

В начале 90-х годов во время бурения на Кольском полуострове специалисты из группы проф. Крагельского И.В. обнаружили интересный феномен. Во время прохождения бура через определенные горные породы его режущие поверхности не только не изнашивались, а упрочнялись и восстанавливались [2]. С этого момента началась работа по поиску и подбору минеральных триботехнических составов. В результате многолетних исследований российскими учеными Никитиным И.В. и Ермаковым В. И. в 1994-1999 годах были запатентованы первые составы на основе минеральных компонент, эти составы имеют защищенное наименование - РВС-технология: (Ремонтно-восстановительный состав), (патент РФ № 2135638 от 27.08.99, приоритет от 26.11.98 г., патент Украины №2442А от 22.04.97}. Сегодня многие компании на рынке России и зарубежья представляют составы, основанные на научных разработках Ермакова В.И. [2].

В 2009г. была создана компания «Святогор-НТ», которая занимается методами восстановления изношенных поверхностей металлов на основе

технологии РВС-ИПИ. Патент РФ №2377340 от 27.12.2009 г. Обработка узлов и механизмов ремонтно-восстановительными составами нашего производства соответствует ТУ-2111-001-0151257833-2008 и дает возможность избирательной компенсации износа трущихся поверхностей за счет образования нового модифицированного поверхностного слоя металлов с рядом добавленных характеристик.

Технология «РВС-ИПИ» использует геомодификатор трения – порошковую мелкодисперсную композицию из природных материалов (оливинов). Она позволяет, используя энергию трения, частично восстанавливать поверхности (от 100 до 300 мкм) изношенных механических узлов, а также придавать поверхностям трения высокие антифрикционные и противозносные свойства.

Область применения РВС-ИПИ: ДВС, коробки передач, редукторы, маслостанции, компрессоры, насосы (все виды), турбины, гидравлические цилиндры и гидросистемы, нагруженные передачи (кроме сцепления), все типы подшипников качения, валки прокатных станков, шнековые и червячные приводы, буровое оборудование и штанги, клапанные механизмы ДВС, скрытые детали трения, салазки станков, ползуны и т.д.

Ревитализант РВС ИПИ используется для обработки узлов и механизмов, в составе жидких и консистентных смазок, охлаждающих жидкостей и горючих смесей по расчетным объемам. В табл.1 показаны основные характеристики модифицированных поверхностей трения.

Таблица 1

Коэффициент линейного термического расширения	13,6-14,2
Коэффициент трения	0.003-0,007
Микротвердость поверхности	1000HV
Ударная прочность кг/кв.мм.	> 60
Высокая коррозионная стойкость	
Объемы нанесения РВС-ИПИ – от 0,1 до десятков грамм в зависимости от объема масла или гидросистемы.	

В табл.2. показаны основные характеристики по результатам обработки поверхностей трения на ЧШМ.

РВС-ИПИ технология открыла механизм управления градиентом плотности дислокаций трущихся поверхностей и как следствие - управление барьерным эффектом приповерхностного градиента плотности дислокаций (debris-слоем). Он достаточно сложен и является «ключиком» ко всему процессу управления износом. Умение искусственно управлять debris-слоем позволяет управлять и прочностью материала по сравнению с его исходным состоянием.

Поверхностные источники дислокаций вступают в действие первыми и генерируют большее количество дислокаций, чем объемные источники (внутри металла). Дислокации от поверхностных источников перемещаются на большее расстояние, чем от объемных. Действие указанных факто-

ров, как правило, приводит к большему упрочнению поверхностных слоев кристалла металла. Данный процесс имеет гетерогенный тип. Управление зарождением дислокаций, их размножением, перемещением приповерхностного слоя повышенной плотности дислокаций и есть основа РВС-ИПИ технологии.

Таблица 2

Количество добавки к смазке, % об.	Смазывающие свойства ЧШМ (ГОСТ 9490) смазок с добавкой															
	Диаметр пятна износа Ди, мм (противоизносные свойства)				Критическая нагрузка Рк, Н (противоизносные свойства)				Грузка сваривание Рс, Н (противоизносные свойства)				Индекс задира Из (интегральный показатель при ступенчатой нагрузке)			
	0	1	5	10	0	1	5	10	0	1	5	10	0	1	5	10
ЦИАТИМ-201+ (РВС-ИПИ, 3мкм)	0,73	0,56	0,56	0,55	441	490	696	980	1235	1235	1568	1744	16,6	28,4	37,6	51,5
ЦИАТИМ-201+ (РВС-ИПИ, 10 мкм)	0,73	0,48	0,48	0,45	441	549	872	1098	1235	1381	1744	1960	16,6	29,4	56,5	61,5
Литол-24 + (РВС-ИПИ, 3мкм)	0,82	0,71	0,60	0,56	549	549	696	980	1381	1381	1744	1744	23,9	28,1	33,2	54,2
Литол-24+ (РВС-ИПИ, 10 мкм)	0,82	0,68	0,52	0,51	549	549	784	980	1381	1381	1744	1960	23,9	29,8	34,4	55,6

Следует отметить, что зарождение дислокации может быть обусловлено также особенностями атомно-электронной структуры и динамики кристаллической решетки металла и, как следствие этого, влиянием указанных факторов на особенности изменения термодинамических параметров с учетом определенного вклада термодинамических функций, относящихся к трущейся поверхности кристалла металла. Причем, вклад этих эффектов будет максимально проявляться для систем, имеющих большую удельную долю поверхности и малые поперечные размеры (тонкие пленки, дисперсные системы и порошки, нитевидные кристаллы и др.)

РВС-ИПИ заданным образом увеличивает количество вакансий и искусственно заполняет их легирующими или примесными элементами (для данного типа кристалла металла), что значительно увеличивает количество винтовых дислокаций. Дислокации вступают в конкурентную борьбу на своих границах, это существенно влияет на пластичность и упругость поверхности кристалла металла. Кроме того, если приповерхностный градиент плотности дислокаций рассматривать как одну из форм неоднородности микропластической деформации, приводящей к хрупкому, усталостному и другим видам разрушений, то вполне естественно, что, зная кине-

тику и закономерности формирования такой неоднородности, можно научиться сознательно ею управлять и прогнозировать (эффект). Это, в свою очередь, позволяет откорректировать существующие и наметить пути создания новых технологических способов поверхностного упрочнения, обработки и соединения материалов, контроля износа, схватывания и, наконец, безизносный режим трущихся поверхностей в механизмах.

Использование данной технологии позволяет увеличить твердость поверхности, износостойкость, понизить коэффициент трения, восстановить первоначальную геометрию деталей, оптимизировать процессы трения и восстановления поверхностей, подверженных износу. Данный вывод подтверждается результатами исследований в лабораториях университетов и исследовательскими центрами профильных институтов. На рис.1 и 2. показаны спектрограммы виброускорений до и после обработки РВС-ИПИ сделанные испытательной лабораторией ООО «ЭМАШ» УрФУ.

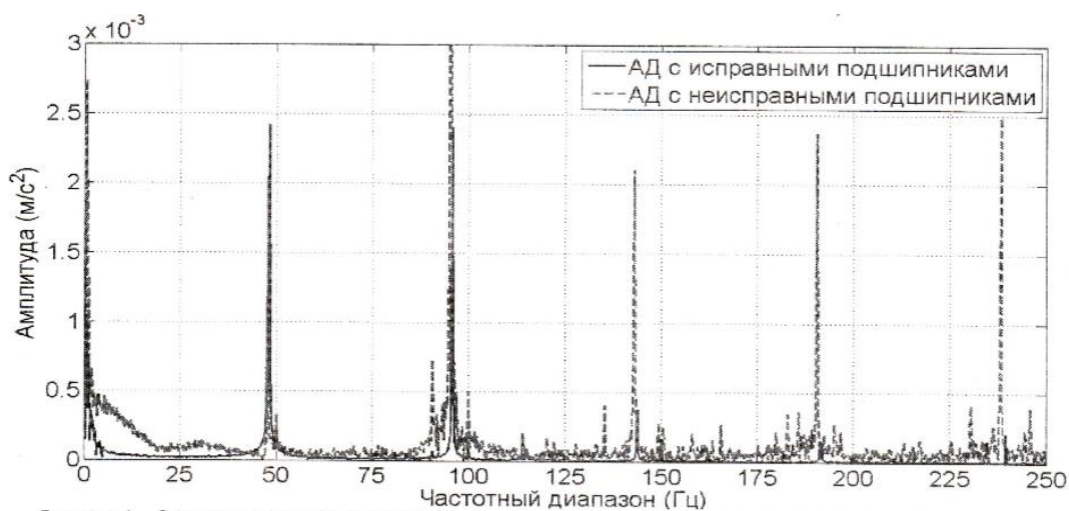


Рисунок 1 – Спектрограмма виброускорений при работе АД с исправными и неисправными подшипниками

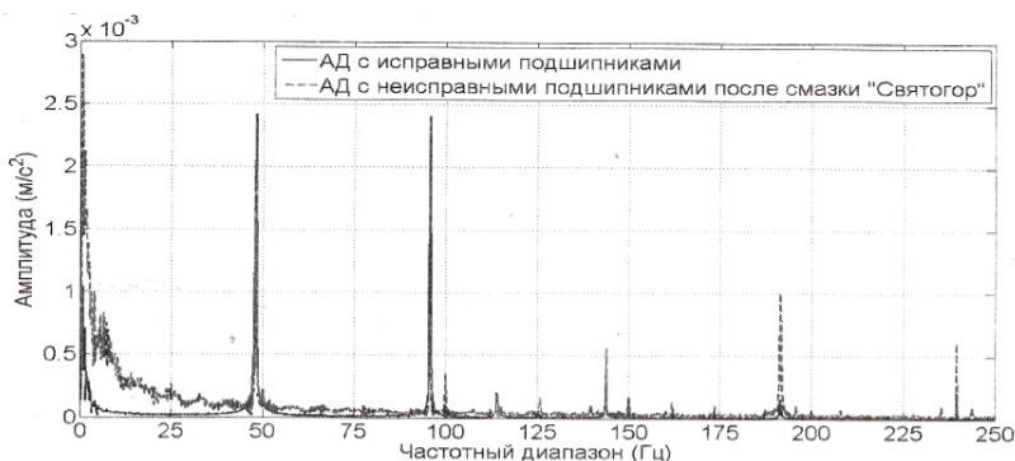


Рисунок 2 – Спектрограмма виброускорений при работе АД с исправными и неисправными подшипниками (после использования триботехнической композиции на основе литола и серпентинитов)

В заключении лаборатории сделан вывод о целесообразности применения РВС-ИПИ, который позволяет снизить механические потери и уровень вибрации в подшипниковых узлах машин.

Исследования, проведенные лабораторией ЦНИИМ, подтверждают, что РВС-ИПИ способствует формированию в точках контакта трущихся поверхностей, твердых износостойких дискретных образований за счет тепловых флуктуаций, что позволяет снизить $K_{тр}$ и увеличить работоспособность машин и механизмов.

Исследования, проведенные испытательной лабораторией ЮРГУ, выявили изменения в составе, плотности, твердости модифицированного слоя стальной пластины после применения РВС ИПИ на глубину до 300мкм.

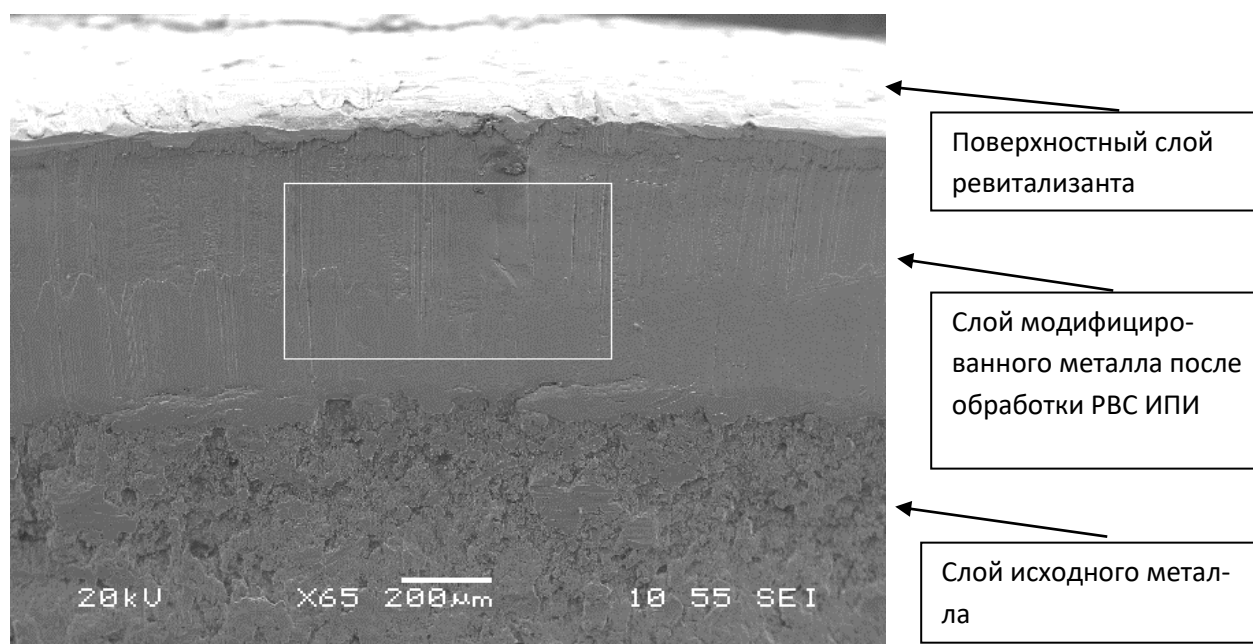


Рисунок 3. Микроструктура торца стальной пластины, обработанной РВС ИПИ

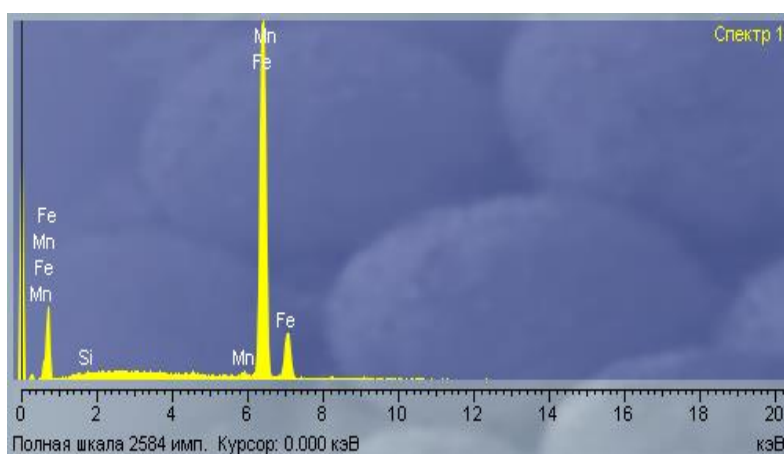
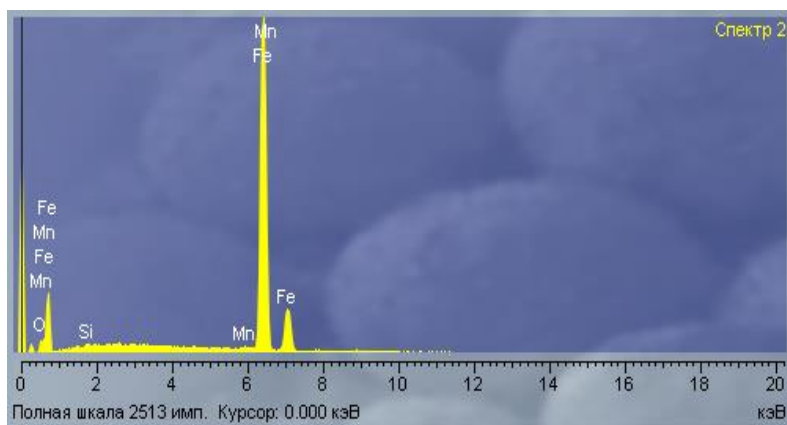


Рисунок 4. Спектральный анализ стали до обработки РВС-ИПИ

Таблица 3

Параметры до обработки:		
Выполнен анализ всех элементов (нормализован)		
Все результаты в весовых %		
Хим. состав. Спектр 1		
Si	Mn	Fe
0.39	1.12	98.49
Итого 100.00		

Таблица 4



Параметры обработки:			
Выполнен анализ всех элементов (нормализован)			
Все результаты в весовых %			
Хим. состав Спектр 2			
O	Si	Mn	Fe
6.47	0.22	0.32	93.00
Итого 100.00			

Рисунок 5. Спектральный анализ стали после обработки РВС-ИПИ

Для оценки изменения технического состояния агрегатов до и после применения технологии РВС ИПИ применение вибромониторинга является достаточным, т.к. позволяет оценить тренды в состоянии агрегатов. Если требуется более точное выявление дефектов во всех механизмах трения, то необходимо проводить вибродиагностику с детальным анализом виброспектров по алгоритму: подшипник – механизм – агрегат.

Для контроля состояния агрегатов требовалось провести измерения соответствующих общих уровней вибрации, которые позволяют оценить текущее состояние агрегата. Динамика трендов общих уровней вибрации помогает проследить изменение состояния агрегата и вовремя обнаружить развитие дефектов.

Измерения производились с помощью мобильной лаборатории в составе: сертифицированного анализатора спектра Z017-U2 зав. №1580 с акселерометрами ВС-110 и ВС-111 и программного обеспечения ZETLab для обработки и анализа спектров производства ЭТСМ.

Был использован простейший из виброакустических методов - метод измерения общего уровня вибрации. В этом случае в широких частотных диапазонах виброметром измеряются или среднеквадратичные значения, или пиковые значения виброускорения, виброскорости или виброперемещения механических колебаний.

Виброускорение $a = d^2 x / dt^2$ целесообразно измерять на высоких частотах, так как его амплитуда пропорциональна квадрату круговой частоты.

Виброскорость $v = dx / dt$ измеряют в ограниченном динамическом диапазоне или если спектр виброскорости машины либо оборудования относительно равномерный по частоте.

Вибросмещение x наиболее часто используется для измерения низкочастотных механических колебаний.

Метод измерения (СКЗ) среднего квадратичного значения временного сигнала вибрации. Среднее квадратичное значение временного сигнала вибрации – является функцией временного анализа вибрации, которая характеризует мощность сигнала вибрации.

Для временного сигнала вибрации, записанного с частотой n -сэмплов СКЗ вычисляется по следующей формуле: $СКЗ = \sqrt{\frac{1}{n \sum_{i=0}^{n-1} y^2 j}}$.

Результаты применения РВС ИПИ на «флендере» декомпозера №11 УАЗ СУАЛ в режиме штатной эксплуатации в течение 400 часов позволили отказаться от капитального ремонта и вывести параметры подшипников четырехступенчатого редуктора «флендера» декомпозера на оптимальный уровень соизмеримый с сравнительно новым декомпозером №6.

На рис. 6 показан четырехступенчатый редуктор «флендер» с массой вала 120т., с объемом маслосистемы 200л., декомпозера емкостью 3500т.



Рисунок 6. Четырехступенчатый редуктор «флендер»

На рис.7 показаны значения СКЗ виброскорости, измеренные на корпусе флендера декомпозера №11 (15лет эксплуатации) до применения РВС ИПИ синим цветом, после применения РВС ИПИ красным цветом и на флендере декомпозера №6 (3года эксплуатации) зеленым цветом.

На спектрограмме, выполненной в полярных координатах рис. 8 после использования режима синхронного накопления вибросигналов хорошо видно биение вала «флендера» в направлении 143–90 град.

Через 400 часов работы декомпозера в штатном режиме после применения РВС ИПИ параметры подшипников вошли в норму и биение вала прекратилось. Была получена значительная экономия энергопотребления т.к. токи нагрузки уменьшились на 11,1% с 64А до 56 А.

Результаты применения технологии РВС ИПИ на предприятиях БАЗ РУСАЛ, полученные в 2017 году, показали уменьшение вибрации подшипников со стороны двигателя от 31% до 56%, со стороны колеса от 10 % до 46% на мельничных вентиляторах, на вентиляторах дымососов со стороны двигателя от 5 % до 85 %, со стороны колеса от 77 % до 85 % в рад, танг. и осевых измерениях.

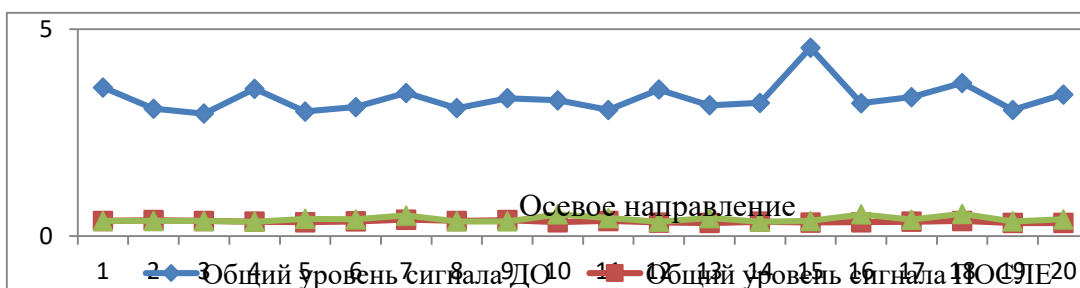
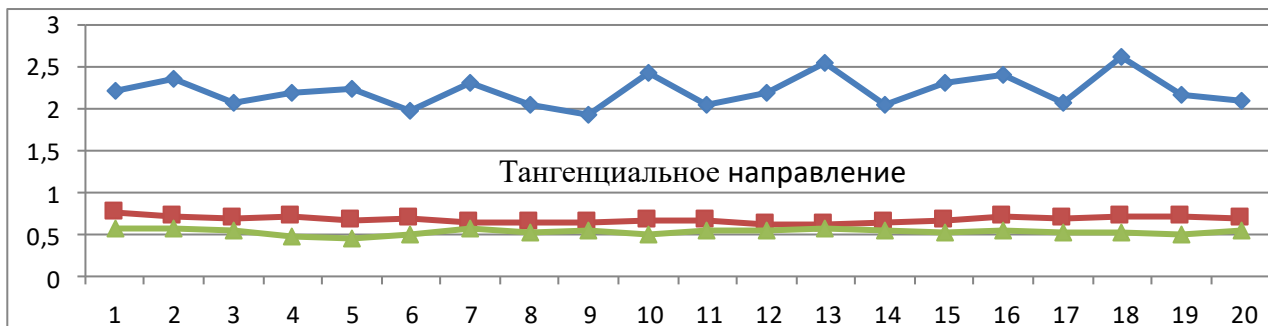
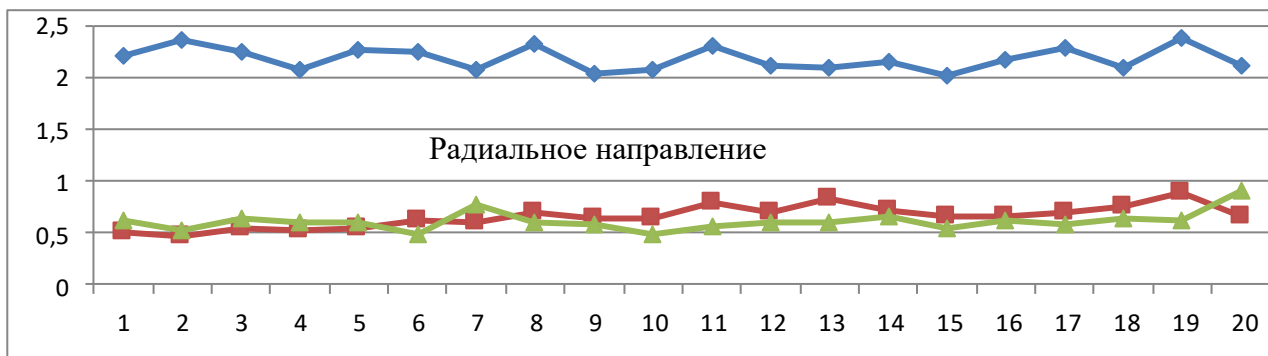


Рисунок 7. СКЗ виброскорости на флендерах декомпозеров №11 и №6

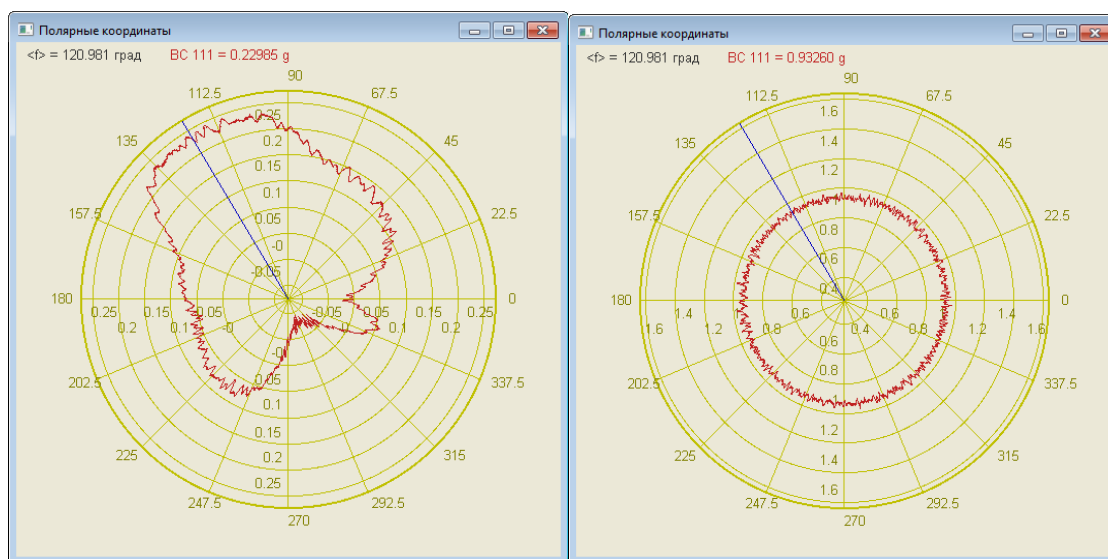


Рисунок 8 Спектрограммы вибросигналов (осевое направление), выполненные в полярных координатах до и после применения РВС ИПИ

Аналогичные результаты были получены на ГПА-16 «Урал» и турбинах ГТК-10-4Б на компрессорных станциях ГПТГ.

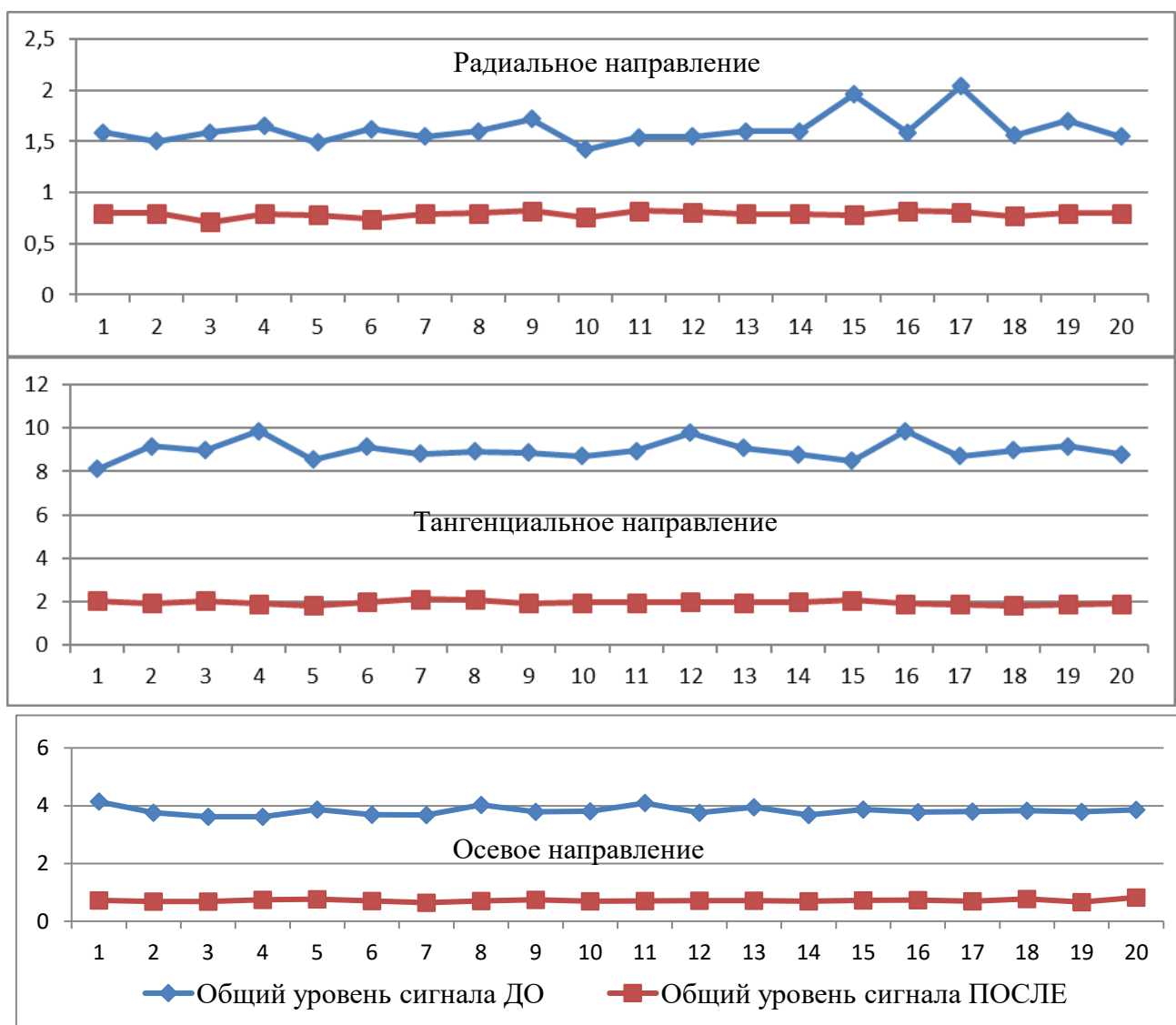


Рисунок 9.Измерение СКЗ виброскорости на подшипниках ГПА -16 «Урал» до и после применения РВС ИПИ

Для вибрации линейными единицами измерения, согласно ГОСТ-Там ИСО, являются: микрометры [мкм] - для измерения виброремещения; миллиметры в секунду [мм/с] - для измерения виброскорости; метры в секунду за секунду [м/с^2], или в единицах ускорения свободного падения $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ [м/с^2 (g)] - для измерения виброускорения. Так же, как и для шума, вибрация может выражаться в относительных единицах - децибелах.

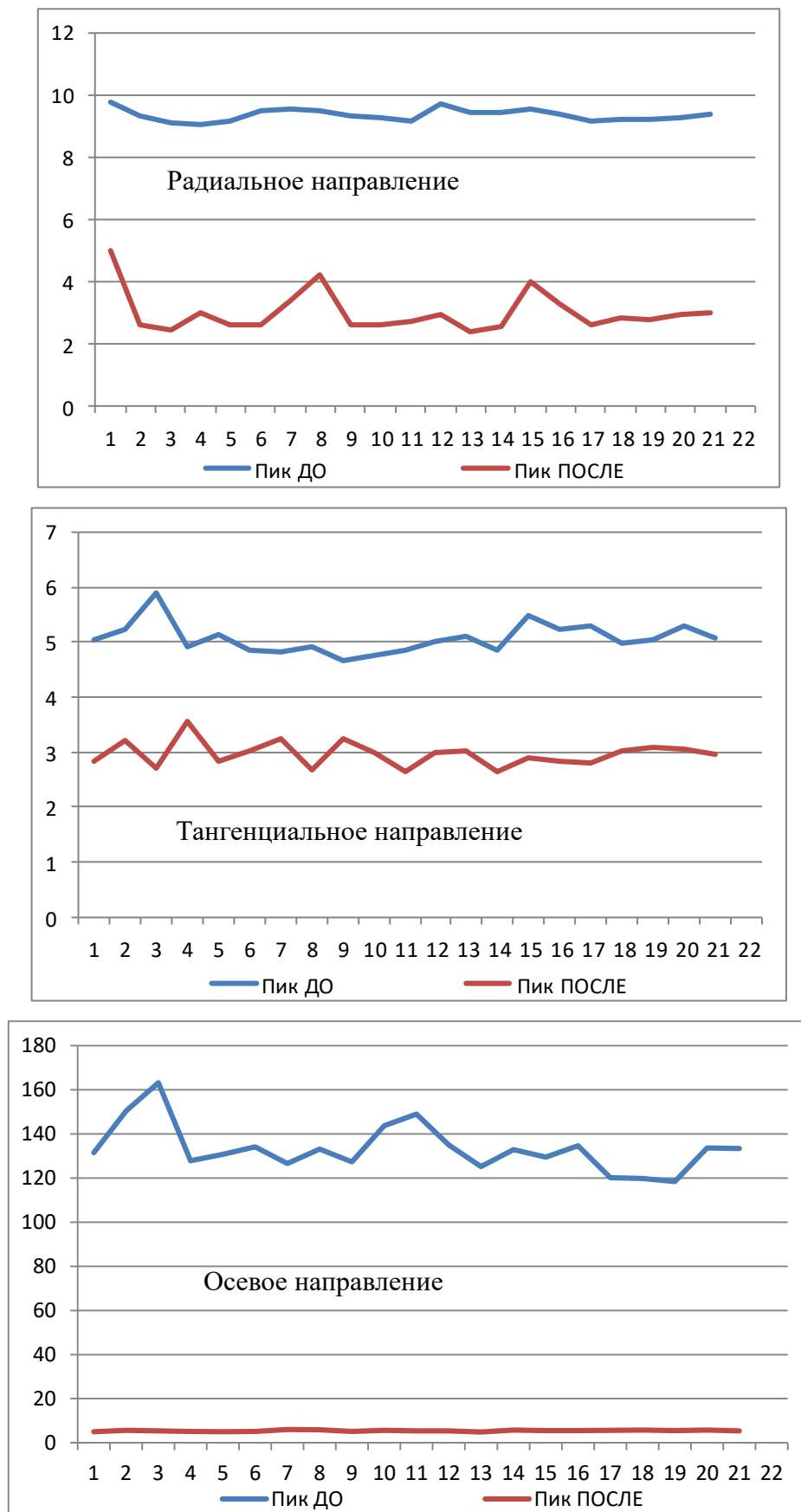


Рисунок 10. Измерение пиковых значений виброскорости в полосе 10 Гц-1 кГц на опорном подшипнике компрессора ТВД ГТК-10-4Б до и после применения РВС ИПИ

Результаты проведенных исследований в ГПТГ:

Применение РВС ИПИ позволило в условиях текущей эксплуатации:

1. Значительно снизить вибрации на подшипниках ГПА-16

Измерения СКЗ виброскорости на переднем подшипнике показало уменьшение вибрации по направлениям: в радиальном на 51,3%, в тангенциальном на 78,3%, в осевом на 81,4%.

Пиковые значения вибросигналов уменьшились по направлениям:

в радиальном на 42%, в тангенциальном на 78,4%, в осевом направлении на 81,7%.

Уменьшение биения вала по оценке в полярных координатах составило:

в радиальном направлении 16,7 %, в тангенциальном направлении 47,5%,

в осевом направлении 83%.

Измерения СКЗ виброскорости заднего подшипника ГПА-16 показало уменьшение вибрации по направлениям: в радиальном на 11,5%,

в тангенциальном на 80,9%, в осевом на 78,6%.

Пиковые значения вибросигналов уменьшились по направлениям:

в радиальном на 8%, в тангенциальном на 81%, в осевом направлении на 80%.

2. По результатам обработки РВС ИПИ подшипников ГТК-10-4Б

Измерения СКЗ виброскорости на опорном подшипнике ТНД показало уменьшение вибрации по направлениям: в радиальном на 97,2 %, в тангенциальном на 91,4%, в осевом на 94,6%.

Пиковые значения вибросигналов уменьшились по направлениям:

в радиальном на 97,4%, в тангенциальном на 90,2%, в осевом направлении на 92%.

Измерения СКЗ виброскорости опорно\упорного подшипника ТВД показало уменьшение вибрации по направлениям: в радиальном на 82,5 %, в тангенциальном на 55,3%, в осевом на 93,4%.

Пиковые значения вибросигналов уменьшились по направлениям:

в радиальном на 68%, в тангенциальном на 41,5%, в осевом направлении на 95,9%.

Выводы:

1. За счет оптимизации поверхности качения подшипниковых узлов снижаются шум, вибрации и нагрев, увеличивается многократно ресурс обработанных узлов и механизмов, повышается время работы в аварийных режимах сложных агрегатов и механизмов.

2. Стоимость ремонта снижается в разы, на 10–15% уменьшаются эксплуатационные энергозатраты (экономия топлива, электроэнергии).

3. В связи с малым количеством композиции и тонкости фракции максимально снижена опасность засорения внутренних каналов и фильтров.

4. Выявленные противопоказания к применению РВС-ИПИ: значительные механические повреждения узлов трения, одновременное применение с другими присадками, кондиционерами, смазками из-за возможной химической несовместимости.

5. Все проведенные исследования подтверждают эффект от применения РВС-ИПИ: частичное восстановление изношенных поверхностей, упрочнение поверхностей трения, снижение коэффициента трения в парах трения происходит в режиме штатной эксплуатации.

Библиографический список

- 1) Мур Д. Основы применения трибоники. Пер. с англ. к.ф.-м.н. С.А.Харламова под ред. д.т.н., проф. И.В.Крагельского и к.т.н. Г.И.Трояновской. – М.: Мир, 1978. - 483 с.
- 2) Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.
- 3) Марков Д.П. Трибология и ее применение на железнодорожном транспорте Труды ВНИИЖТ. - М.: Интекст, 2007. - 408 с.
- 4) Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров: монография Омск: изд-во ОмГТУ, 2013. - 240 с.
- 5) Бреки А.Д., Медведева В.В. и др. Жидкие и консистентные смазочные композиционные материалы, содержащие дисперсные частицы гидросиликатов магния, для узлов трения управляемых систем Тула: Изд-во ТулГУ, 2016.-166 с.
- 6) И.Ф. Пустовой. 14-летний опыт Питерской РВС-технологии/ Труды ГОСНИТИ, т. 107, М., 2011.

Выбор предельной глубины резания при точении поверхности переменного профиля

Боршова Л. В., канд. техн. наук, доц.
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

В статье рассмотрены вопросы определения глубины резания при черновой токарной обработке деталей сложного профиля в зависимости от геометрических характеристик обрабатываемой поверхности. Показан характер изменения предельной глубины резания при изменении геометрических параметров контура детали и режущего инструмента.

Получены графики, позволяющие определить предельно допустимую величину припуска, допускающего выполнение однократной обработки поверхности переменного профиля с различными углами наклона обрабатываемой поверхности для резцов, оснащенных режущими пластинками разных форм в пределах имеющегося диапазона размеров.

Ключевые слова: глубина резания, переменный профиль.

Главной задачей технолога при проектировании технологического процесса является выбор рационального варианта обработки детали. Немаловажную роль в решении этой задачи играет правильное определение величины параметров режима резания.

Рассмотрим вопросы, возникающие при выборе экономичных режимов токарной обработки деталей с переменным профилем наружной или

внутренней поверхностей. Они, как правило, имеют сложное очертание, состоящее из цилиндрических, конических, сферических и криволинейных участков, причем диапазон колебания размеров детали даже при обработке одного участка может быть значительным.

В условиях обработки деталей с большим перепадом диаметров величина скорости резания значительно изменяется в процессе выполнения технологического перехода. В случае же обработки с постоянной скоростью резания частота вращения шпинделя меняется в большом диапазоне. При обходе криволинейного профиля будет меняться и фактическая величина подачи. Вместе с тем на черновых операциях значение глубины резания также является величиной переменной. При этом возникают сложности с определением стойкости инструмента и силы резания. Для их определения используются эмпирические формулы, в которые значения режимов резания входят в степени не равной единице, поэтому изменение фактического значения любого параметра обработки приводит к существенному отклонению величин, рассчитанных по таким формулам, от их реального значения.

Первым этапом назначения режимов обработки является определение глубины резания. При чистовой и получистовой обработке решение этой задачи обычно не вызывает проблем и определяется требованиями чертежа по точности размеров и качеству поверхностей детали. При черновой же обработке глубину резания рекомендуется назначать максимальной, исходя из параметров инструмента и возможностей станка.

В тех случаях, когда деталь обрабатывается из цилиндрической заготовки на станках с ЧПУ, определение оптимальной глубины резания обычно не вызывает затруднений, потому что черновой профиль детали формируется с использованием одной из схем многопроходной обработки. Как правило, такая обработка выполняется параллельно оси детали и ничем не отличается от обработки цилиндрической поверхности, что позволяет воспользоваться справочными рекомендациями по назначению глубины резания. Если используется схема с подборкой, точение по контуру детали в конце каждого прохода идет на небольшую высоту, не превышающую предельно допустимую глубину резания. Если же применена схема с получистовым проходом, то для его выполнения требуется уменьшать глубину резания в соответствии с рекомендациями для получистовой обработки.

Проблема правильного выбора глубины резания появляется при обработке детали из штампованной или литой заготовки. Когда детали обрабатываются большими партиями, экономически целесообразно изготавливать точную заготовку. При этом колебание величины припуска на всех поверхностях детали будет незначительным, но это не значит, что условия обработки всех элементов контура детали будут одинаковыми. Дело в том, что выполняя обработку по контуру, резец совершает плоскопараллельное перемещение. При перемещении резца по криволинейной траектории с из-

менением профиля обрабатываемой поверхности будут меняться реальные значения главного φ и вспомогательного φ_1 углов в плане (рис. 1).

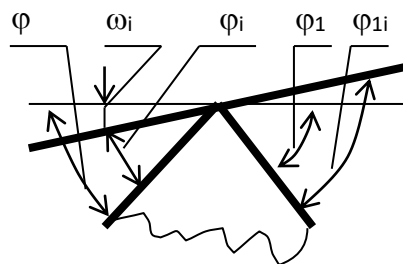


Рисунок 1. Изменение углов в плане при изменении профиля поверхности

Это оказывает влияние на условия протекания процесса резания и должно быть учтено при определении величины параметров режима резания. Исключение составляет обработка деталей на оборудовании, оснащённом инструментальной головкой, способной менять ориентацию инструмента в процессе обработки, при изменении профиля детали.

При увеличении угла наклона обрабатываемой поверхности ω_i увеличивается толщина срезаемого слоя и может достигнуть значений, превышающих допустимую глубину резания для выбранной пластины. При автоматизированной разработке управляющей программы система программирования автоматически выполняет проверку возможности обработки рассматриваемого элемента профиля. В противном случае технолог должен самостоятельно выполнить такую проверку.

Ситуация еще более осложняется при обработке маленьких партий деталей. В этих условиях изготавливать для каждого типоразмера детали свою заготовку становится невыгодно и разрабатывают групповую заготовку, что позволяет существенно снизить себестоимость. Однако появляется другая проблема – припуск становится переменной величиной, поэтому для каждого геометрического элемента контура необходимо выполнять проверку возможности его обработки однократным точением.

Наиболее просто задача решается для конических участков, имеющих постоянный угол наклона обрабатываемой поверхности. Для сферических элементов необходимо определить угол наклона касательной к образующей профиля. Этот угол является переменной величиной, но для таких участков достаточно выполнить проверку только для наиболее опасной зоны с максимальным углом наклона касательной. Для выпуклой поверхности это точка начала сферического элемента, а для вогнутой поверхности – точка его окончания (рис. 2).

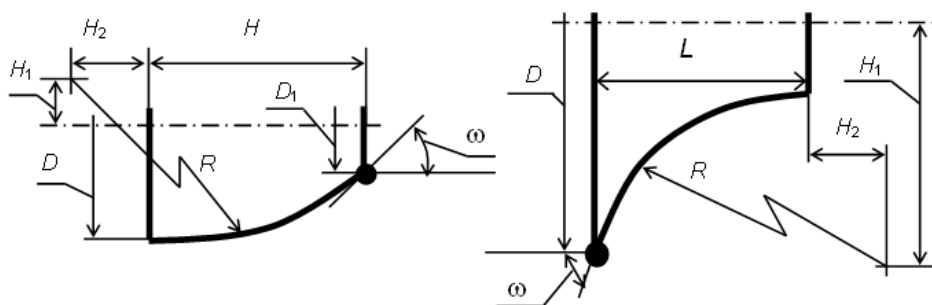


Рисунок 2. Параметры сферических поверхностей

Угол наклона касательной к образующей профиля для выпуклой поверхности с возрастающим диаметром определяется по формуле (1)

$$\omega = -\arccos \frac{0.5D_1 + H_1}{R} = -\arcsin \frac{H + H_2}{R}. (1)$$

Угол наклона касательной к образующей профиля для вогнутой поверхности с возрастающим диаметром определяется по формуле 2

$$\omega = -\arccos \frac{H_1 - 0.5D}{R} = -\arcsin \frac{L + H_2}{R}. (2)$$

Наиболее часто при черновой обработке используют резцы с ромбической пластиной с главным углом в плане 95° и углом при вершине 80° . Такие пластины имеют размеры $b = 6 - 25$ мм. На рис. 3 приведены графики, позволяющие определить предельно допустимую величину припуска в зависимости от угла наклона обрабатываемой поверхности.

С помощью этого графика для каждого размера режущей пластинки можно проверить возможность обработки имеющегося припуска однократным точением. В тех случаях, когда для данной поверхности такая обработка невозможна, следует выбрать резец с пластиной большего размера или разбивать припуск и выполнять обработку за два прохода.

Также при черновой обработке используют резцы с квадратной пластиной. Размеры таких пластин: $b = 9 - 25$ мм. На рис. 4 приведены графики, позволяющие определить предельно допустимую величину припуска в зависимости от угла наклона обрабатываемой поверхности.

Возможно использовать при черновой обработке резцы с треугольной пластиной с углом при вершине 60° . Размеры таких пластин: $b = 6 - 33$ мм. На рис. 5 приведены графики, позволяющие определить предельно допустимую величину припуска в зависимости от угла наклона обрабатываемой поверхности.

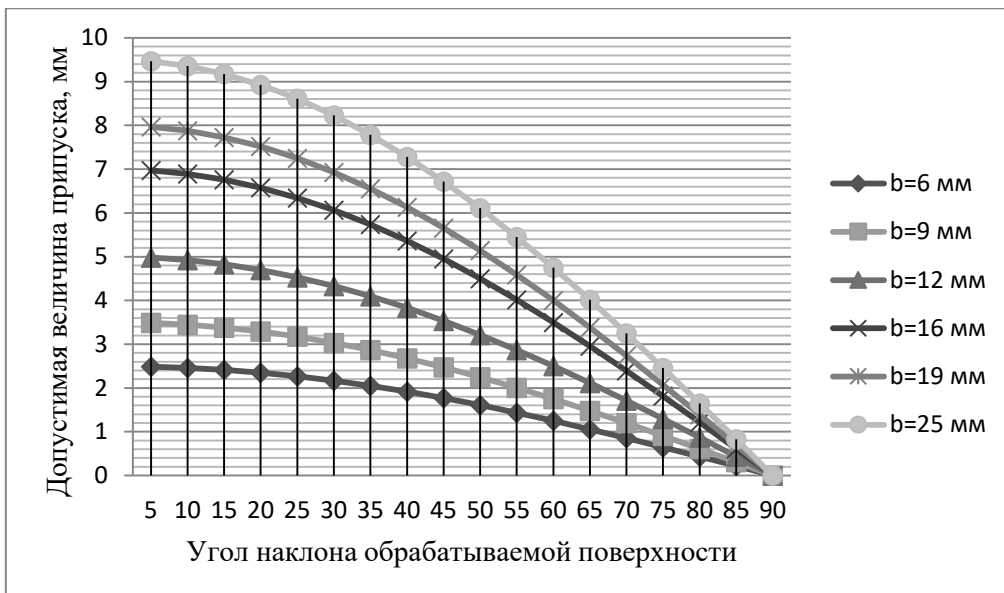


Рисунок 3. Допустимая величина припуска для ромбической пластины

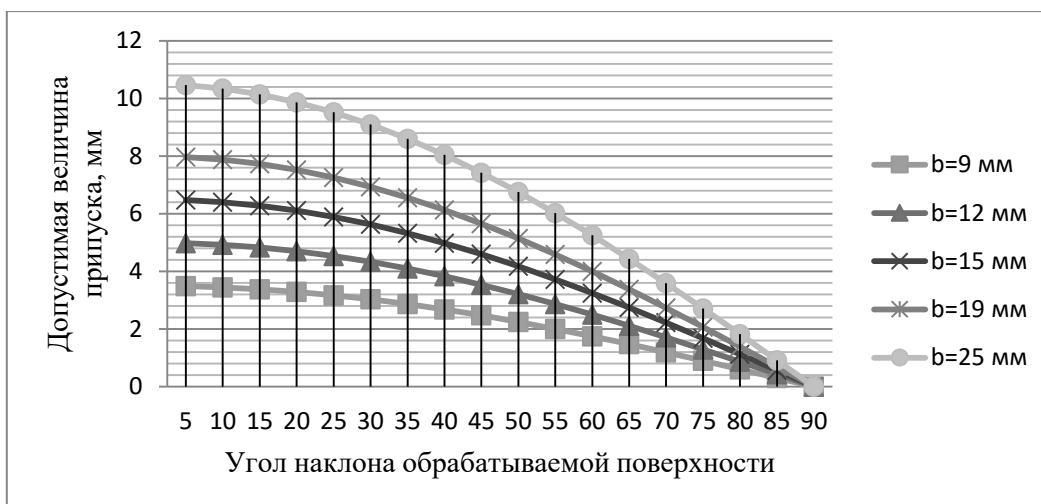


Рисунок 4. Допустимая величина припуска для квадратной пластины

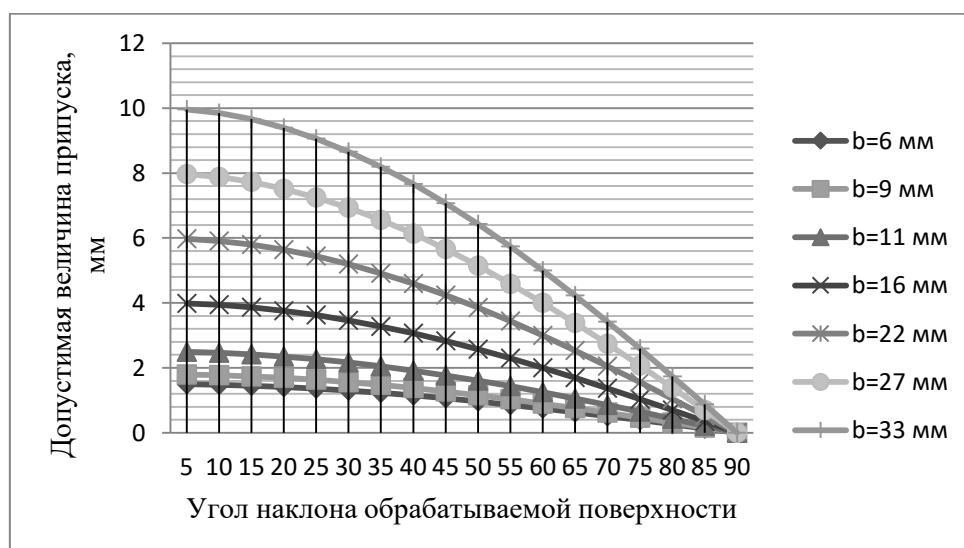


Рисунок 5. Допустимая величина припуска для треугольной пластины

Обработку криволинейных поверхностей часто бывает выгодно выполнять резцами с круглой пластиной. Диаметр таких режущих пластинок варьируется от 5 до 32 мм. Такие резцы позволяют выполнять обработку не только полуоткрытых, но и закрытых зон контура детали. Такая пластина позволяет выполнять обработку в пределах отдельного геометрического элемента с постоянной глубиной резания, однако на стыке элементов возможен резкий скачок толщины срезаемого слоя. Поэтому в таких точках также требуется выполнить проверку возможности обработки. Для этой цели получены графики, представленные на рис. 6.

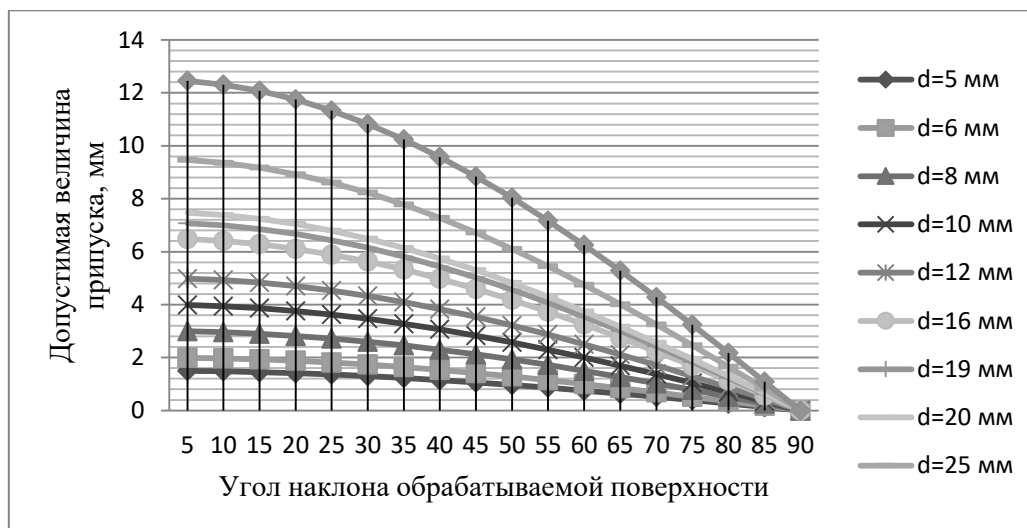


Рисунок 6. Допустимая величина припуска для круглой пластины

Таким образом, получены графики, позволяющие определить предельно допустимую величину припуска, допускающего выполнение однократной обработки поверхности переменного профиля с различными углами наклона обрабатываемой поверхности для резцов, оснащенных режущими пластинками разных форм в пределах имеющегося диапазона размеров.

Исследование микроструктуры сварных соединений, выполненных в условиях отрицательных температур

Голиков Н. И., канд. техн. наук,
 Сидоров М. М., канд. техн. наук
 Максимова Е. М.
 ИФТПС СО РАН, г. Якутск
 Сараев Ю. Н., докт. техн. наук
 ИФПМ СО РАН, г. Томск

Проведено исследование макро- и микроструктуры сварных соединений, полученных сваркой на постоянном и модулированном токе (импульсно-дуговой сваркой) с применением отечественных сварочных электродов в условиях отрицательных температур. Для исследований применены стереомикроскоп «Stemi 2000-C» и оптический микроскоп Neophot 32. Выявлено, что при импульсно-дуговой сварке происходит из-

мельчение структуры металла шва, по сравнению со сваркой на постоянном токе независимо от марки применяемого электрода, что может положительно повлиять на повышение хладостойкости сварного соединения.

Ключевые слова: Сварные соединения, металл шва, импульсно-дуговая сварка, покрытые электроды, низкие климатические температуры, структура.

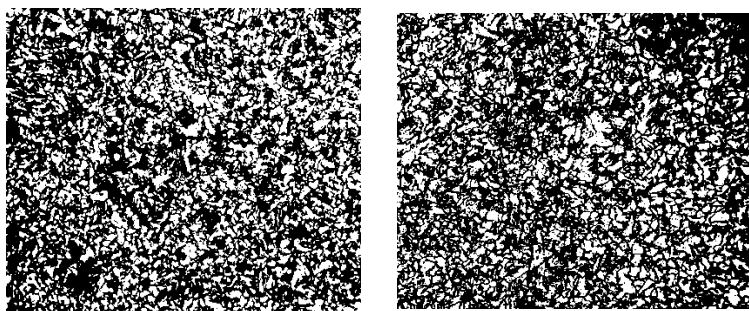
Одной из актуальных проблем машиностроения для Северных регионов России является получение надежных и хладостойких сварных соединений. В зависимости от применяемого сварочного материала, условий и режима сварки стали одного и того же химического состава можно получить самые различные соотношения характеристик прочности, пластичности, упругости и вязкости [1-3]. При этом плавление металла и формирование шва при сварке, а также возникновение в них остаточных напряжений и деформаций приводит к значительному снижению механических характеристик и сопротивлению к хрупкому разрушению сварных соединений [4], что существенно ограничивает использование дуговой сварки в сварочно-монтажных и ремонтных работах в условиях низких температур. Поэтому для внедрения и обоснования применения современной технологии сварки в условиях отрицательной температуры необходимо проведение металлографических исследований получаемых ими сварных соединений.

Проведены исследования микрошлифов образцов, изготовленных из сварных соединений, стали 09Г2С, на стереомикроскопе «Stemi 2000-C» и оптическом микроскопе Neophot 32 при увеличениях 20 и 100-200 соответственно. Сварка швов выполнено двумя методами: сваркой инверторным источником питания NEON ВД-315 на постоянном токе и ФЭБ-315 «МАГМА» на модулированном токе (импульсно-дуговая сварка) в условиях положительных (+20 °С) и отрицательных температур (-45 °С) с применением следующих марок электродов отечественного производства: ЛБ-52TRU (ООО НПЦ «Сварочные материалы», Краснодар), ХОБЭКС-К-54 (ЗАО «Волгоградский завод сварочных материалов ХОБЭКС») и УОНИ 13/Мороз (ООО «Высокие технологии», Москва).

Исходная структура стали феррито-перлитная с величиной зерна № 9-10 по ГОСТ 5639-82. Исследования микроструктуры металла шва облицовочного слоя всех образцов показали, что они имеют крупнозернистую столбчатую структуру, где зерна вытянуты в одном направлении. Металл шва, заполняющего и корневого слоев всех образцов, имеют характерную мелкозернистую структуру с равномерным распределением зерен феррита и перлита, что особенно часто встречается при многослойной сварке. Выявлено, что при импульсно-дуговой сварке размер зерен металла шва меньше, чем при сварке на постоянном токе. Для примера на рис. 1 приведены микроструктуры металла шва в заполняющем слое, полученных сваркой на модулированном (СМТ) и постоянном токе (СПТ) в условиях отрицательной температуры с применением электрода марки ЛБ 52TRU.

Полученные результаты хорошо согласуются с ранее полученными результатами [5-6], в которых был установлен эффект существенного из-

мельчения структуры металла шва и зоны термического влияния при использовании импульсно-дуговой сварки покрытыми электродами.



a

б

Рис. 1. Микроструктуры металла шва в заполняющем слое, полученных (а) СМТ и (б) СПТ в условиях отрицательной температуры (-45°C) с применением электрода ЛБ 52TRU, x200

Вышеуказанный эффект достигается за счет регулируемого тепловложения, а также возможности управления процессами плавления и кристаллизации металла шва при частотах модуляции, лежащей в диапазоне 0,25-5,0 Гц [6]. Увеличение частоты свыше 5,0 Гц приводит к усреднению теплового потока и эффекта, регулируемого

тепловложения не происходит из-за тепло инерционности расплава. При этом резко возрастает размер зерна и увеличивается в размерах зона термического влияния.

Существенная разница обнаружена в структурах облицовочных слоев, в зависимости от условий сварки. В облицовочных слоях всех образцов, полученных в условиях отрицательных температур, наблюдаются крупные участки структурных составляющих в виде белых пятен. В условиях положительных температур независимо от марки применяемого электрода и режима сварки таких пятен не наблюдается. Структуры остальных слоев (заполняющие и корневые) практически одинаковы во всех случаях. Для примера на рис. 2 приведена макроструктура сварных соединений, полученных сваркой в условиях положительной и отрицательной температуры с применением электрода марки УОНИ 13/Мороз.

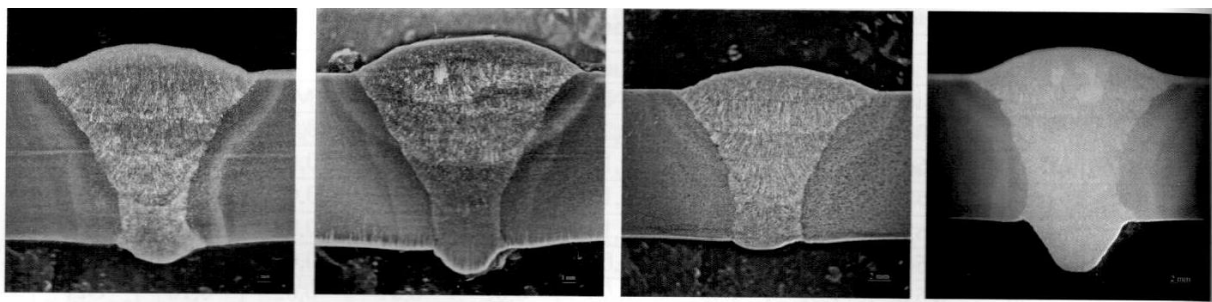


Рис. 2. Макроструктура стыковых соединений, выполненных электродом марки «УОНИ 13/Мороз», x20:

- а) Образец № 15 СМТ (+20 °С); б) Образец № 17 СМТ (-45°С);
 в) Образец № 16 СПТ (+20 °С); г) Образец № 18 СПТ (-45°С)

Это может быть связано с более медленным охлаждением сварного соединения. На данных участках, где образовались крупные кристаллиты, была проведена измерение твердости по Виккерсу при нагрузке 5 кг. По

результатам измерений получено, что твердость крупных кристаллитов находится в той же области, что и твердость сварного соединения – 217HV (217 HB). Таким образом, можно сказать, что образование таких кристаллитов на снижение прочностных характеристик не влияет.

Заключение

Установлено, что на формирование структуры металла шва значительно влияет температура окружающего воздуха, при которой осуществляется процесс сварки. Значительное различие в размерах, структурных составляющих зоны неразъемного соединения наблюдается в структурах облицовочных слоев металла шва, полученных в условиях отрицательных температур, где имеются крупные участки структурных составляющих в виде белых пятен, по сравнению со сварными соединениями, полученными при положительных температурах окружающего воздуха, независимо от марки применяемого электрода и режима сварки.

Представленные результаты подтверждают перспективность развиваемого подхода, направленного на получение новых классов материалов и изделий из них, предназначенных для работы в условиях Севера и Арктики.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 16-19-10010.

Библиографический список

1. Ларионов В.П. Электродуговая сварка конструкций в северном исполнении. Новосибирск: Наука, 1986. – 252 с.
2. Аммосов А.П. Обеспечение хладостойкости и эксплуатационной прочности сварных соединений металлоконструкций и техники Севера: Автореф. дис... д-ра техн. наук. – СПб: 1994. – 31 с.
3. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение. М.: Машиностроение, 1990. 528 с.
4. Голиков, Н.И. Прочность сварных соединений резервуаров и трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях Севера: монография/ Н.И. Голиков, А.П. Аммосов; Ин-т физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН. Якутск: Изд-во СВФУ, – 2012. – 232 с.
5. Saraev Y.N., Bezborodov V.P. Effect of the energy parameters of the welding process on the structure and properties of welded joints in low-alloy steels // Welding International. – 2013. – Vol. 27, iss. 9. – P. 678-680. – doi: 10.1080/09507116.2012.753276.
6. Saraev Yu. N., Bezborodov V. P., Gladkovskiy S. V. & Golikov N. I. Improving the reliability of metallic structures in service in the conditions with low climatic temperatures by efficient application of advanced methods of modification of the zone of the welded joint // Welding International. – 2017. – Vol. 31, iss. 8. – P. 631-636. – doi:10.1080/09507116.2017.1307512.

Горелки для дуговой сварки в защитных газах плавящимся электродом

Гуднев В. Н.

ООО «Индустриальные сварочные горелки» (ООО ИВТ), г. Екатеринбург

В данной статье рассказывается о перспективном направлении изготовления сварочных горелок для дуговой сварки в защитных газах с использованием сырья отечественных производителей. Фирма «Индустриальные сварочные горелки («ИВТ»)), на базе которой создано производство расположена в городе Екатеринбург. Качество используемых материалов для изготовления сварочных горелок для дуговой сварки в защитных газах превосходит зарубежные аналоги.

В статье раскрываются основные особенности производства силового кабеля, как горелок с естественным охлаждением, так и сварочных горелок с жидкостным охлаждением. Проводится сравнительный анализ преимуществ применяемой инновационной оболочки перед сырьем, используемым другими производителями.

Ключевые слова: сварочные горелки, импортозамещение, кабель ВКОХ, оболочка, ПВХ, EPDM-резина, кремнийорганических соединений, медь, латунь, качество, гибкость, оплетка, сжатые сроки, части горелки.

По программе импортозамещения фирмой ООО «Индустриальные сварочные горелки» (ООО «ИВТ») в начале 2017 года было организовано производство промышленных сварочных горелок для полуавтоматической сварки плавящимся электродом в среде защитных газов. Производство открыто в г. Екатеринбурге с целью поддержать спрос производственных предприятий в отечественных сварочных горелках, повысить ликвидность сырья российского происхождения, а также снизить отток капиталов из РФ путем снижения доли импорта производственных товаров.

На март 2017 г. уровень локализации производства горелок с «воздушным» (естественным) охлаждением составляет более 63%.

Продукция соответствует ГОСТ-Р, техническому регламенту ТС, что подтверждается соответствующими документами.

Для изготовления сварочных горелок наша фирма старается применять преимущественно сырье российского происхождения.

«Сварка в деталях»— это не просто слоган, это наш девиз. Только вникнув в детали, самую суть, возможно, найти лучшее решение, избежать ошибок и предложить лучшее для потребителя, наших партнеров. Самое важное кроется в деталях: в удобстве пользования горелкой, в ее надежности и безотказности.

Наши преимущества:

- профессиональные знания и опыт;
- высокий уровень качества — мы постоянно следим за качеством сырья для нашей продукции, а так же готового изделия;
- индивидуальный подход и гибкость.



Сварочная горелка RT-36 с «воздушным»
(естественным) охлаждением



Сварочная горелка RT-501W
с жидкостным охлаждением

Сварочная горелка является очень важной частью сварочного аппарата. Ее эргономичность, вес, продуманность конструкции и функциональность влияют на процесс сварки не меньше, чем само сварочное оборудование и квалификация сварщика. Ведь даже если у вас самая последняя модель сварочного аппарата от ведущего производителя, то это не поможет, если вы используете сварочную горелку низкого качества: кнопка «залипает», «гусак» перегревается, система жидкостного охлаждения протекает. А конструкция самой сварочной горелки не выдерживает критики – сварочная горелка тяжелая, кабель не гибкий (особенно при низких температурах), рукоятка неудобная и т. д. Сварщик просто не сможет долго с ней работать вследствие чего качество самой сварки будет неумолимо падать к концу смены. А такие факторы, как: качество электрической и термической изоляции очень важны для обеспечения защиты сварщика, влияя на то, будет ли выполнена работа в срок и качественно.

В настоящее время на отечественном рынке доля иностранного производителя сварочных горелок для дуговой сварки в защитных газах составляет не менее 95%! В свою очередь иностранных производителей можно условно разделить на две группы это Европа и юго-восточная Азия.

Касательно материалов из чего собственно и изготавливаются сварочные горелки для дуговой сварки в защитных газах ситуация еще интереснее. Ни для кого не является секретом, что стоимость любого изделия определяется стоимостью входящих в него деталей (элементов). Есть бюджетные изготовители, а есть изготовители «дорогие». Большинство фирм – изготовителей сварочных горелок для дуговой сварки в защитных газах для удешевления себестоимости своих изделий используют такие материалы как различные модификации поливинилхлоридов (ПВХ). ПВХ легкий и имеющий презентабельный внешний вид материал, относительно просто и малозатратно наносится на многие материалы, но имеющий следующие существенные недостатки – в процессе эксплуатации быстрое старение под влиянием таких факторов, как температура, воздействие светового излучения, химические реакции при взаимодействии с жидкостями и маслами. Вследствие старения ПВХ покрытие становится жестким и хрупким.

Более дорогим, но часто применяемым материалом, чем ПВХ является покрытие для кабеля это EPDM резина. В своей основе EPDM резина это каучук на основе сополимера этилена и диенового мономера (Ethelene

Propylene Diene Elastomer). Говоря простым языком, это очень эластичный материал, стойкий к УФ излучению, озону и влаге. Он также устойчив к старению, чем обусловлено его широкое использование в строительстве и автомобильной промышленности. В состав EPDM резины входит сажа, поэтому такой параметр как электроизоляция в некоторых случаях находится не на высоком уровне. EPDM резина обычно черного цвета. Благодаря насыщенной структуре EPDM резина обладает очень хорошей устойчивостью к озону, воздействию атмосферы и старению, но абсолютно не стоек к минеральным маслам. Для компенсации такого недостатка, как низкая устойчивость к минеральным маслам в состав EPDM-резины вводят различные модификаторы.

Материал для покрытия кабеля в частности сварочных горелок с «воздушным» (естественным) охлаждением который использует наша фирма это полимер на основе высокомолекулярных кремнийорганических соединений. Данные материалы обладают рядом уникальных качеств в комбинациях, отсутствующих у любых других известных веществ: способности увеличивать или уменьшать адгезию, придавать гидрофобность, работать и сохранять свойства при экстремальных и быстроменяющихся температурах или повышенной влажности, диэлектрические свойства, химическая инертность, эластичность, долговечность, экологичность. В частности такой показатель, как диэлектрические свойства у покрытия на основе высокомолекулярных кремнийорганических соединений в разы больше, чем покрытий упомянутых выше (ПВХ и EPDM-резина)! В частности при толщине покрытия на основе высокомолекулярных кремнийорганических соединений в 1,5 мм диэлектрические свойства почти в два раза выше, чем у покрытия кабеля из EPDM-резины толщиной 2,5 мм. Рабочая температура эксплуатации применяемого нами покрытия от -40 до +260°C. В части минусовых и плюсовых температур эксплуатации изделий можно еще уменьшить и увеличить эти цифры, это повлияет на механические свойства, что в свою очередь будет не очень хорошо влиять на эксплуатационные свойства сварочной горелки.

Для внутреннего канала сварочных горелок с «воздушным» (естественным) охлаждением на 340 и 450А мы используем трубки с увеличенным внутренним диаметром 9х7мм для того, что бы минимизировать отрицательные моменты использования защитного газа из цеховой магистрали с пониженным давлением. Материал такой трубки – полиуретан. Полиуретан относится к конструкционным материалам (КМ), механические свойства полиуретана дают возможность использовать его в деталях машин и механизмов, подвергающихся силовым нагрузкам. К данному виду промышленных материалов предъявляются очень серьезные требования с точки зрения сопротивляемости воздействию агрессивной внешней среды. Использование полиуретанов ограничено температурным диапазоном применения (от -60 до +80 °С) в отличие от материалов на основе высокомолекулярных кремнийорганических соединений.

Материалы на основе высокомолекулярных кремнийорганических соединений и полиуретан являются более дорогими материалами в отличие от ПВХ и EPDM-резины, но эксплуатационные свойства этих материалов значительно выше. Но в итоге «переплатив» за изделие из более дорогих материалов заказчик прилучает срок службы изделия в целом, удобство в эксплуатации в различных температурных режимах, безопасность выше.

Теперь касательно материалов сопловой группы сварочных горелок. Здесь ситуация следующая. По ГОСТ на электротехнические материалы используется медь (М0 и М1) и медесодержащие сплавы, а именно латунь. Для подобных изделий допускается использование латуни марки не ниже, чем ЛС63-3 ГОСТ 15527 (содержание меди 62–65%). Для сравнения марка латуни ЛС59 содержит 57–60% меди.

Сопловая группа «дорогих» сварочных горелок комплектуются частями в основном из меди (М0 и М1). Чем ниже стоимость сварочной горелки, тем количество деталей из меди падает.

Самая дорогая по стоимости часть сварочной горелки с «воздушным» (естественным) охлаждением это силовой кабель (ВІКОХ). Его стоимость составляет приблизительно 70% от стоимости самой горелки. Для выполнения этого кабеля зарубежные производители сварочных горелок используют медный провод толщиной отдельной жилы 0,2мм. Количество «намотанного» медного провода зависит от сварочного тока, на который будет эта горелка эксплуатироваться. А учитывая то, что материал покрытия кабеля, выполненного из ПВХ или EPDM-резины не гибкий, то и изделие в целом не будет отличаться эластичностью.



Силовой кабель (ВІКОХ) без изоляции для сварочных горелок с «воздушным» (естественным) охлаждением



Силовой кабель без резиновой трубки для сварочных горелок с жидкостным охлаждением

Для изготовления оплетки кабеля сварочной горелки с «воздушным» (естественным) охлаждением наша фирма применила медный провод диаметром 0,1 мм. В совокупности с материалом покрытия кабеля на основе высокомолекулярных кремнийорганических соединений мы смогли получить кабель с очень высоким показателем гибкости. Данный параметр был очень высоко оценен сварщиками.

Силовой кабель для сварочных горелок с жидкостным охлаждением, так же изготавливается с применением медной проволоки диаметром 0,1 мм общим сечением кабеля 16 кв. мм. Трубка, в которую устанавливается силовой кабель, выполнена из резины устойчивой к воздействию различных агрессивных сред, а также резиновая трубка с наружи армирована синтетической нитью. Запрессовка силового кабеля в резиновую трубку производится только с помощью медных гильз на гидравлическом прессе, которые обеспечивают надежное фиксирование элементов силового кабеля.

Наша фирма может изготовить сварочные горелки любой длины от 0,5 до 6,0 метров в сжатые сроки. Так же возможна поставка любой части сварочной горелки независимо от типа ее охлаждения.

Наши специалисты постоянно совершенствуют технологию изготовления, и выбирают преимущественно материалы и компоненты для изготовления сварочной горелки отечественных производителей.

Моделирование технологических процессов

Дегтянникова В. А.

АО «ЕВРАЗ КГОК», г. Качканар

Цель. Снижение газопотребления котлом БКЗ-220-100Ф ст. № 3 филиала «Качканарская ТЭЦ» АО «ЕВРАЗ КГОК» за счет увеличения КПД котла с 93,5 % до 94,5 %.

Метод. Снижение присосов холодного воздуха в газозоудушном тракте за счет демонтажа скрубберов и «спрямления участка газохода».

Результат. Демонтаж скрубберов котла БКЗ-220-100Ф ст. № 3 и спрямление газохода намечено как мероприятие по увеличению топливной эффективности котла.

Выводы. Экономия топлива на котле за счет повышения КПД составит 711 тун в год, что в денежном эквиваленте 2,436 тыс. руб.

Качканарская ТЭЦ расположена на промплощадке Качканарского горно-обогатительного комбината.

ТЭЦ запущена в эксплуатацию в 1963 г. и предназначена для выработки электрической и тепловой энергии и обеспечения подразделений ГОКа и жилых домов г. Качканара.

Установленная электрическая мощность ТЭЦ составляет 50 МВт, установленная тепловая мощность- 352 Гкал\ч. Проектное топливо-торф, с 1993г. основное топливо-природный газ, резервное – мазут.

Котлы филиала «Качканарская ТЭЦ» были спроектированы на сжигание твердого топлива, что требовало применение золоулавливающих установок мокрого типа МП-ВТМ диаметр 3300 мм -скрубберов, в количестве 4 штук на котлах БКЗ-220-100Ф ст. № 3,4 и по 2 на котлах БКЗ-80-13 ст. №1,2 для улавливания твердых частиц золы в дымовых газах.

После перехода станции на газомазутное топливо очистка дымовых газов мокрыми золоуловителями стала не нужной.

В настоящий момент горячие дымовые газы после котлов по газоходам попадают в скруббера (орошение скруббера водой не производится),

поэтому единственная «полезность» скрубберов- передача тепла горячих дымовых газов в здание главного корпуса.

По результатам режимно-наладочных испытаний присосы воздуха в скрубберы и примыкающие к ним газоходы составляют 28,6 % , нормативное значение согласно ПТЭ составляет 5 % (в 5,72 раза выше нормы). Из отчетных документов наблюдается динамика роста присосов холодного воздуха в газоздушном тракте, что ведет к снижению КПД котла и сверхнормативному расходу газа.

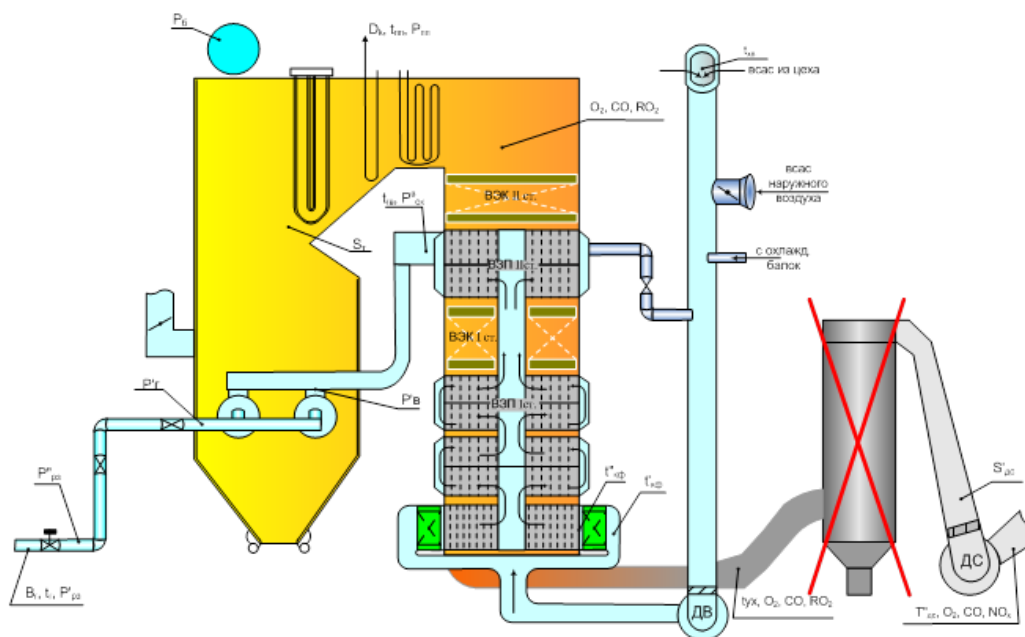


Рисунок 1

За счет демонтажа скрубберов

1. повышение КПД котла 94,5 %
2. Снижение присосов в газоздушном тракте до 5 %

Часовая экономия топлива составит:

$$145 \cdot (0,829 - 0,152) \cdot ((1/0,935 - 1/0,945)/7) = 0,158 \text{ т/ч}$$

145 т/ч среднегодовая паропроизводительность котла

0,829-энтальпия острого пара

0,152-энтальпия питательной воды

7,0 Гкал/т-теплотворная способность условного топлива

Экономия топлива в год составит:

$$0,158 \cdot 4500 = 711 \text{ т/год}$$

4500 кол-во часов работы котла в год

Экономия в денежном эквиваленте:

$$(711/1,115) \cdot 3\,940 = 2\,436 \text{ тыс. рублей}$$

1,15 – коэффициент перевода тут в тыс. м³ природного газа

3 940 руб. – стоимость тыс. м³ природного газа

Внедрение данного мероприятия позволит улучшить технико-экономические показатели нашей станции.

При благополучном внедрении данного мероприятия и получения экономии по сжиганию газа планируется рассматривать демонтаж скрубберов на всех котлах филиала «Качканарская ТЭЦ».

Выбор средств измерения и контроль размеров деталей

Кукина Н. Ю.

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Правильный выбор средств измерений имеет важное значение для определения требуемой точности измерений и основывается на обеспечении заданных показателей процесса технического контроля и анализе затрат на реализацию процесса контроля.

Главным фактором при выборе средства измерения является допускаемая погрешность измерения. При выборе средств и метода измерений необходимо также учитывать диапазон измерений измеряемой величины, условия измерений, эксплуатационные качества средств измерений, их стоимость.

Из нескольких средств измерения одинаковой предельной погрешности следует выбирать такой прибор, который характеризуется наибольшей производительностью, надежностью, простотой обслуживания и наименьшей стоимостью.

Ключевые слова: допуск, точность измерения, погрешность измерения

Правильный выбор средств измерений имеет важное значение для определения требуемой точности измерений.

Недостаточная точность измерений приводит к тому, что часть годной продукции бракуют, в то же время по той же причине другую часть фактически негодной продукции принимают как годную. Излишняя точность измерений, как правило, бывает связана с повышением трудоемкости и стоимости контрольных операций и, следовательно, ведет к удорожанию производства и ограничению выпуска продукции.

Выбор и назначение средств измерений осуществляется на различных стадиях производственного процесса.

На стадии конструирования конструктор участвует в выборе средств измерений только правильным назначением допусков на размеры, исходя из обеспечения работоспособности изделия.

Технолог принимает решение о сохранении допуска или его уменьшении путем введения производственного допуска, указывает конкретные средства измерений и условия их применения с учетом допускаемой погрешности и условий измерений по каждой операции.

Метролог оценивает правильность выбора средств измерений и разрабатывает задания на проектирование специальных средств измерений с учетом допускаемой погрешности и условий измерений.

Основными факторами, определяющими выбор средств измерения, являются:

- ✓ тип производства;
- ✓ конструктивные особенности и размеры контролируемых деталей;

✓ допускаемая предельная погрешность измерения, нормированная стандартами для каждого средства измерения.

В индивидуальном и мелкосерийном производстве целесообразно применять универсальные средства измерения.

При серийном производстве изготавливают взаимозаменяемые детали, узлы и изделия, номенклатура которых не меняется в течение длительного времени. Контрольные операции целесообразно выполнять специализированными контрольными приспособлениями, предельными калибрами и шаблонами и при необходимости универсальными измерительными средствами.

В крупносерийном и массовом производстве технически и экономически выгодным является применение специальных механизированных и автоматизированных средств измерений, т.к. в течение длительного времени в больших количествах изготавливают одни и те же взаимозаменяемые детали, узлы и изделия. Универсальные средства измерений в массовом производстве имеют очень ограниченное применение только при наладке технологического оборудования.

Конструкция детали, ее габаритные размеры и масса имеют значительное влияние на выбор средств измерения. Если габаритная, массивная деталь, то рекомендуется использовать переносные приборы, а если небольшая и легкая, то – стационарные. При малой жесткости детали лучше использовать бесконтактные средства измерений (например, диаметры тонкостенных втулок измеряют пневматическими пробками и скобами).

Выбор средств измерений можно производить по коэффициенту уточнения (запасу точности), на основе информационной теории измерительных устройств, принципу безошибочности контроля [1, 2]. Наиболее распространенным является последний способ, при котором выбор средств измерений производится по известным значениям номинального размера детали, допуска изготовления и погрешности измерения.

Допускаемой погрешностью измерения δ называется предельное значение погрешности измерения, которое может быть допущено при определении действительного размера для оценки соответствия его допускаемым предельным размерам.

Погрешность измерения - это разность между результатом измерения и истинным значением измеряемой величины. Погрешности измерения неизбежны и зависят от погрешностей измерительного средства, метода измерения, установочной меры и установки по ней прибора, условий измерений и других факторов. Установленные стандартом допускаемые погрешности измерений δ включают в себя как случайные, так и не учтенные систематические погрешности, т.е. все составляющие.

Значение допускаемой погрешности измерения δ зависит от допуска на изготовление IT , который в свою очередь связан с номинальным размером и качеством.

В случаях, когда обоснованное назначение средств измерений по точности невозможно из-за отсутствия соответствующей нормативной документации, при выборе средств измерений следует руководствоваться следующим правилом: погрешность измерения (с учетом влияющих факторов) не должна превышать 35 процентов от допуска на контролируемый параметр.

Допускаемая по ГОСТ 8.051-81 погрешность измерения *может быть определена по формуле:*

$$\delta = K_{изм} \cdot IT,$$

где $K_{изм}$ – коэффициент, равный 0,20...0,35.

Значение коэффициента $K_{изм}$ выбирается в зависимости от качества: для классов 2...5 $K_{изм} \leq 0,35$; для классов 6...7; $K_{изм} \leq 0,3$; для классов 8...9 $K_{изм} \leq 0,25$; для классов 10...16 $K_{изм} \leq 0,2$.

Выбор средств измерений состоит в том, чтобы наибольшая предельная погрешность ($\pm \Delta_{lim}$), являющаяся нормированным метрологическим показателем данного измерительного средства, не превышала предела допустимой погрешности измерения (δ), т.е. $\Delta_{lim} \leq \delta$.

Сравнение предельной погрешности Δ_{lim} с допускаемой погрешностью δ производится без учета знака у Δ_{lim} . Чем ближе значение предельной погрешности измерительного средства к значению допускаемой погрешности измерения, тем менее трудоемким и более дешевым будет измерение.

Предельные погрешности Δ_{lim} основных измерительных инструментов и приборов, установленные расчетным или экспериментальным путем, приводятся в специальных таблицах [1, 2].

Из средств измерения выбирают те, табличные значения предельных погрешностей которых удовлетворяют неравенству $\Delta_{lim} \leq \delta$ и наиболее близки к допускаемой погрешности измерения δ . В этом случае не только точность, но и трудоемкость и стоимость измерений будут обеспечиваться в большей мере, более экономически целесообразным будет измерение.

Из нескольких средств измерения одинаковой предельной погрешности следует выбирать такой прибор, который характеризуется наибольшей производительностью, надежностью, простотой обслуживания и наименьшей стоимостью. Кроме того, при выборе средства измерений предпочтение следует отдавать стандартизованным средствам измерений.

По метрологическим характеристикам выбираемыми параметрами средств измерений являются не только предельная погрешность, но и цена деления шкалы измерительного средства. Цена деления шкалы средства измерения выбирается с учетом заданной точности измерения. Например, если размер задан с точностью до 0,01 мм, то прибор выбирается с ценой деления шкалы 0,01 мм. Принятие более грубой шкалы вносит дополнительные субъективные погрешности, а более точной – удорожает средство измерения.

Одну и ту же метрологическую задачу можно решить с помощью различных измерительных средств, которые имеют не только разную стоимость, но и различные точность и другие метрологические показатели, поэтому дают неодинаковые результаты измерения. Измерения с применением средств измерений недостаточной точности малоценны, даже вредны, так как могут быть причиной неправильных выводов. Применение излишне точных средств измерений экономически невыгодно.

Библиографический список

1. Каталог. Средства измерения линейных и угловых размеров в машиностроении. М.: НИИмаш, 1980. – 350 с.
2. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм. (По применению ГОСТ 8.051-81) РД 50-98-86. М. : Изд-во стандартов, 1987.

Особенности расчета напряженно-деформированного состояния танка-контейнера с учетом реального нагружения в эксплуатации

Макеев С. В., канд. техн. наук
ИЦ ЖТ «СЕКО», БелГУТ, г. Гомель, Республика Беларусь
Буйленков П. М.
БелГУТ, г. Гомель, Республика Беларусь

В настоящей работе разработана конечноэлементная модель прототипа танка-контейнера модели Т11, выполнено исследование влияния густоты конечно-элементной сетки на точность расчета НДС, проведены натурные испытания на действие ударной нагрузки с построением кривой спектра ударного отклика (СУО) и тензометрированием, исследовано поведение контейнера в эксплуатации на железнодорожном транспорте при ударном взаимодействии, выполнен сравнительный расчет прочности танка-контейнера при различных вариантах сочетания нагрузок и граничных условий.

Ключевые слова: танк-контейнер, испытания, подвижной состав, испытания, моделирование, метод конечных элементов, прочность.

С каждым годом увеличивается использование контейнеров в перевозочном процессе разными видами транспорта, разрабатываются новые модели. Учитывая мультимодальность использования контейнеров, на первый план выходит проблема обеспечения прочности из-за разности действующих нормативных нагрузок на морском, автомобильном и железнодорожном транспорте. На стадии проектирования необходимо уделять большое внимание расчету напряженно-деформированного состояния (НДС) для обеспечения безопасности, сохранности перевозимого груза с одновременным снижением металлоемкости для увеличения конкурентоспособности. Все это требует детального исследования поведения контейнеров и определения нагрузок, действующих в эксплуатации с целью совершенствования методики расчета и испытаний.

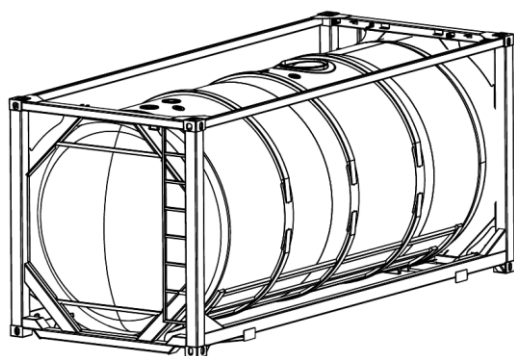
Развитие численных методов анализа и, в первую очередь метода конечных элементов (МКЭ), позволяет получать точные решения для доста-

точно сложных объектов. К таким объектам относятся и танки-контейнеры. Они имеют довольно сложную конструкцию, испытывающую в эксплуатации значительные статические и динамические нагрузки, поэтому их достоверный расчет возможен только с помощью МКЭ, который позволяет проводить многовариантные расчеты с выявлением слабых мест конструкции, выбором рациональных сечений и толщин элементов.

Для решения статических задач методом конечных элементов БелГУТ использует пакет программ DSMFem, разработанный сотрудниками кафедры «Динамика и прочность машин» Брянского государственного технического университета.

Расчет прочности разработанного танка-контейнера согласно [2] предполагает 18 расчетных режимов, что не мало, особенно если учитывать возможную доработку конструкции на этапе проектирования. Поэтому необходимо выяснить при какой же дискредитации модели точность расчета будет высокая, но в тоже время будет требоваться меньше вычислительной мощности. На данном этапе исследований учитывался наиболее неблагоприятный режим эксплуатации контейнеров – ударное продольное воздействие в платформу при действии нормативной нагрузки.

Общий вид и технические характеристики исследуемого контейнера представлены на рис. 1 и в табл. 1 соответственно.



Масса брутто, т	36
Масса тары, т	4
Габарит по ISO 668, ГОСТ Р 53350	1CC
Габариты, мм:	
-длина	6058
-ширина	2438
-высота	2591
Внутренний диаметр котла, м	2,4
Внутренняя длина котла, м	6
Максимальное рабочее давление, МПа	0,4

Рисунок 1. Общий вид и технические характеристики прототипа танка-контейнера модели Т11

Процесс проведения прочностных расчетов с применением МКЭ можно разделить на несколько этапов:

- создание геометрической модели объекта;
- наложение конечно-элементной сетки;
- задание внешних связей;
- моделирование нагрузок;
- решение системы уравнений и расчет напряжений в узлах;
- анализ результатов.

Этап создания геометрической модели в условиях пакета DSMFem начинается с формирования основного файла данных. Перед вводом параметров модели задается тип решаемой задачи (в нашем случае – объемная

задача), описываются узлы, которые затем объединяются в линии, из которых потом формируются поверхности.

Дискретизация области зависит от практического опыта расчетчика. Некачественная сетка, даже в случае точного моделирования других этапов может приводить к неверным результатам. С одной стороны, чем меньше размер конечного элемента, тем выше точность расчета, с другой стороны слишком густая сетка утяжеляет модель и увеличивает время расчета.

Так как танк-контейнер образует пространственную конструкцию, имеющую достаточно тонкие стенки по сравнению с характерными размерами всего объекта, то будем использовать плоские треугольные 3-узловые и четырехугольные 4-узловые пластины (в пакете DSMFem тип P3 и P4 соответственно) (рис. 2).

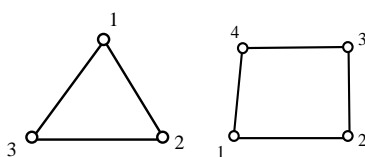


Рисунок 2. Общий вид используемых конечных элементов
a – элемент типа P3, *b* – элемент типа P4

Следует отметить, что при работе с этими элементами желательно, чтобы их форма была близка к равностороннему треугольнику либо прямоугольнику, в этом случае они дают бóльшую точность по сравнению с использованием произвольных вытянутых трех- и четырехугольников. Вблизи предполагаемых концентраторов напряжений величина рядом стоящих элементов не должна существенно отличаться.

В рассчитываемой модели были наложены ограничения кинематических связей согласно [2]. Величина и действие активных сил, действующих на конструкцию, определялись согласно [2]. Давление гидравлического удара на днище котла задавалось равномерно распределенной нагрузкой на пластины. Обечайка котла и неударное днище тоже были нагружены распределенной нагрузкой на пластины, но величина давления изменялась по градиенту вдоль вертикальной оси танка-контейнера от минимального значения в верхней части, до максимального в нижней.

В качестве первого варианта расчета, использовались пластинчатые конечные элементы с довольно грубой разбивкой. Данная конечно-элементная модель имела 53167 узлов и 48368 конечных элементов. Имелась неравномерная разбивка по конструктивным группам конструкции. Описанная расчетная модель приведена на рис. 3.

Из рисунка видно, что имеется неравномерная разбивка по конструктивным группам конструкции. В первую очередь это вызвано особенностями работы пакета DSMFem, в нем отсутствует возможность автоматического разбиения модели, а также возможность создания регулярной сетки. Балки бóльшего сечения имели более грубую сетку, особенно в местах, где ожидалось малоизменяющиеся относительные деформации. Такая за-

ведомо незначительно укрупненная разбивка расчетной модели была сделана с целью определения влияния размера конечного элемента на точность расчета, исследования общего поведения конструкции под нагрузкой, для выявления зон с наибольшим уровнем напряжений, а также с целью максимально снизить время расчета и как следствие затраты в плане вычислительной мощности рабочей станции.

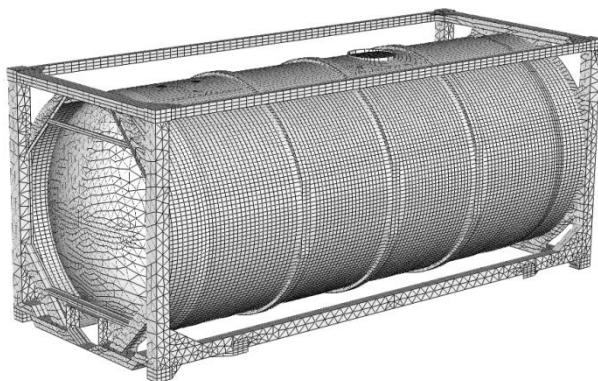


Рисунок 3. Расчетная модель прототипа танка-контейнера

В результате проведения расчета были получены данные об эквивалентных напряжениях, перемещениях, выявлены зоны концентрации напряжений, а также зоны с большой относительной разницей напряжений в смежных элементах. Напряженно-деформированное состояние танка-контейнера с указанием этих зон приведено на рис. 4.

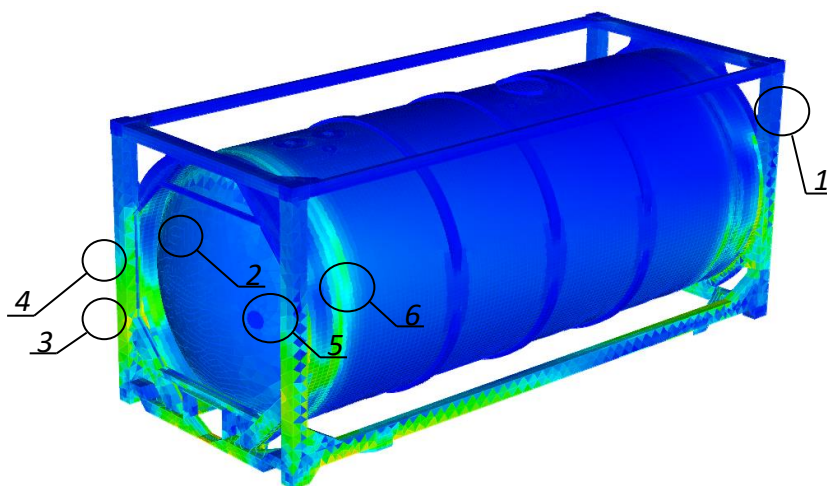


Рисунок 4. Напряженно-деформированное состояние танка-контейнера с указанием зон концентрации напряжений

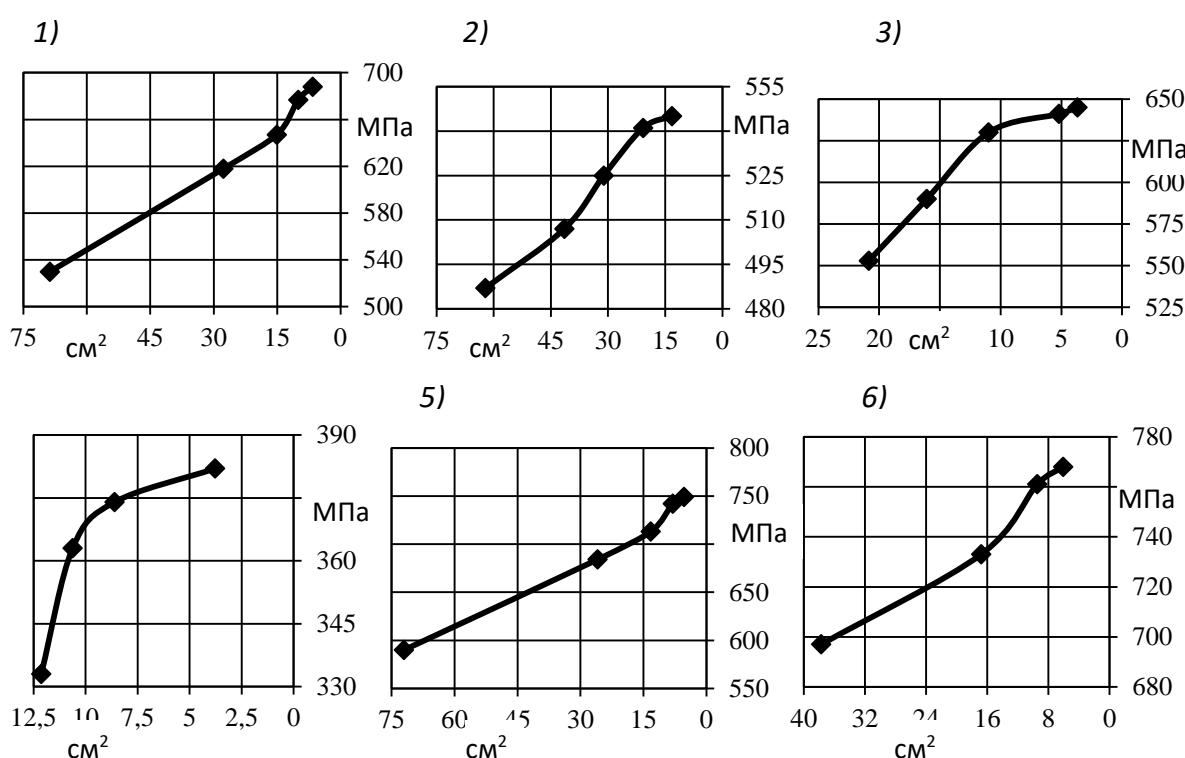
Далее исследование влияния величины конечных элементов на точность получаемых результатов наблюдались непосредственно в указанных зонах концентрации напряжений. Качество сетки повышалось последовательным уменьшением размера конечных элементов до тех пор, пока шаг уменьшения площади конечных элементов в сетке соответствовал малому

приращению значения максимального эквивалентного напряжения в рассматриваемом узле.

Так как густота сетки напрямую зависит от площади конечного элемента, поэтому для оценки качества сетки построим кривые показывающие зависимость максимального напряжения от площади элемента.

Графики зависимостей максимального эквивалентного напряжения от размера конечного элемента в зоне приведены на рис. 5.

Уменьшение площади конечного элемента (увеличении густоты разбивки) независимо от его формы (типа) ведет к увеличению величины напряжений до определенного уровня. Дальнейшее сгущение конечно-элементной сетки не приводит к значительному уточнению возникающих максимальных напряжений, однако существенно увеличивает время расчета.



1, 2, 3, 4, 5, 6 – номера зон из рисунка 4

Рисунок 5. Графики зависимости максимальных эквивалентных напряжений от размера конечного элемента

Последняя редакция модели танк-контейнера имела 70810 узлов и 67874 конечных элемента, время расчета при этом выросло в 3,5 раза по сравнению с первоначальным результатом на ЭВМ с четырехъядерным процессором AMD FX-серии с тактовой частотой 4,2 ГГц. Данную конечно-элементную модель будем считать эталонной с точки зрения получения достоверных данных НДС конструкций танков-контейнеров (рис. 6).

Каждый танк-контейнер для допуска к эксплуатации должен получить сертификат соответствия требованиям безопасности Российского морского регистр судоходства согласно нормативным документам.

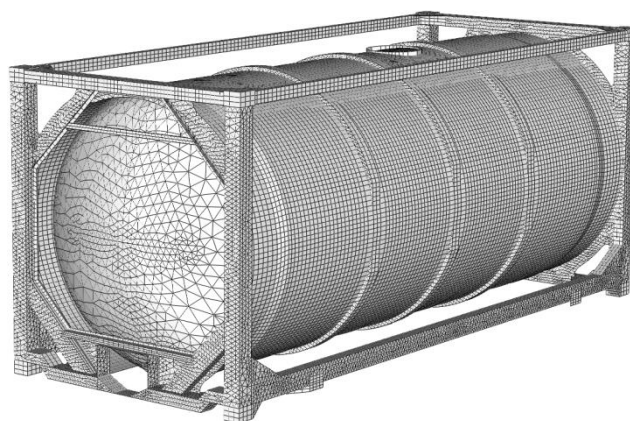


Рисунок 6. Обоснованная расчетная модель танка-контейнера

Нормативным документом по испытаниям контейнеров цистерн являются «Общие положения по техническому наблюдению за контейнерами. Правила изготовления контейнеров. Правила допущения контейнеров к перевозке грузов под таможенными печатями и пломбами. Правила технического наблюдения за изготовлением контейнеров. Правила технического наблюдения за контейнерами в эксплуатации. НД 2-090201-009».

Помимо статических испытаний новые контейнеры подвергаются динамическим испытаниям на стенде-горке с построением кривой СУО. Методика ударных испытаний регламентирует установку загруженного танка-контейнера на платформу, при этом ограничиваются перемещения танка-контейнера во всех направлениях и минимизируются зазоры между фитинговыми упорами и фитингами. Оценку прочности контейнера проводят при помощи двух акселерометров, сигнал от которых служит данными для построения кривой СУО (рис. 11). Сила удара считается достаточной, если кривая спектра ударного отклика, полученная при испытаниях, будет превышать минимальную кривую спектра ударного отклика на всех частотах от 3 до 100 Гц. Обычно положительный результат достигается после проведения нескольких ударов. При этом должны отсутствовать остаточные деформации или повреждения.

Этот подход к оценке прочности танка-контейнера разнится с тем подходом, который реализует расчетчик на этапе проектирования, когда оценивает прочность конструкции по напряжениям. При этом задание граничных условий в рассчитываемой модели осуществляется согласно нормативным документам Российского морского регистра судоходства и не учитываются режимы эксплуатации железнодорожного транспорта.

Наиболее жесткий и экстремальный по нагрузкам режим эксплуатации контейнера-цистерны является спуск вагонов с сортировочных горок. В этом случае, согласно [1] продольная нагрузка, приходящаяся в автоцепку вагона с закрепленным на нем танком-контейнером может достигать 3,5 МН [1].

Поэтому при проведении расчетов для определения напряженно-деформированного состояния конструкции контейнера-цистерны рассмат-

ривался динамический режим нагружения на продольный удар согласно [2].

Определим расчетные нагрузки, действующие на контейнер-цистерну в этом режиме. Вертикальная нагрузка

$$P_B = m_{\text{бр}} g, \quad (1)$$

где $m_{\text{бр}}$ – масса брутто контейнера-цистерны, кг;
 g – ускорение свободного падения, м/с.

$$P_B = 36 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 353160 \text{ Н.}$$

Согласно [1] для опасных грузов величина перегрузки при продольном ударе должна быть не менее $4g$, тогда инерция груза

$$N_{\text{гр}} = 4m_{\text{бр}} g = 4 \cdot 353160 = 1412640 \text{ Н.} \quad (2)$$

При этом давление гидравлического удара на днище

$$P = \frac{N_{\text{гр}}}{\pi R^2}, \quad (3)$$

где R – радиус котла контейнера-цистерны, м.

$$P = \frac{1412640}{\pi \cdot 1,2^2} = 312262 \text{ Н.}$$

Инерция груза на днище уравновешивается продольной силой, приложенной к фитингам. Определим ее из формулы для нахождения продольной силы инерции груза 4.2 [1]

$$N_{\text{и}} = N_{\text{гр}} \frac{m_{\text{гр}}}{m_{\text{бр}}} = 1412640 \cdot \frac{36000 \cdot 9,81}{32000 \cdot 9,81} = 1589220 \text{ Н.} \quad (4)$$

Схема приложения кинематических сил и граничных условий согласно требованиям Регистра [1] представлена на рис. 7.

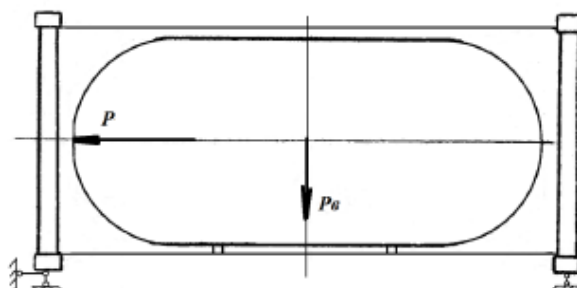


Рисунок 7. Схема приложения нагрузок и граничных условий при динамическом испытании танка-контейнера

Опыт испытательного центра железнодорожного транспорта «СЕКО» проведения работ по испытаниям грузовых танков-контейнеров показывает, что в ходе проведения ударных испытаний из-за сочетания особенностей конструкции фитинговых упоров и продольных нагрузок большой величины происходит их износ. Отсутствие жесткого закрепления контейнера на платформе, наличие зазора между фитингом танка-контейнера и фитинговым упором на вагоне, а также износом в эксплуатации самих фитинговых упоров приводит к тому, что при соударении вагонов контейнер воспринимает ударную нагрузку не всегда одинаково. То есть нагрузка при ударе передается не на все четыре фитинга одинаково, как моделируют расчетчики. Наблюдается значительное подпрыгивание контейнера сразу после удара. При этом подпрыгивать могут как передние, так и задние фитинги. Часто нагрузку от удара воспринимают только диагональные фитинги или фитинги с одной стороны контейнера.

В табл. 2 приведены сочетания нагрузок и граничных условий при расчете танк-контейнера учитывающие поведение танк-контейнера при ударе.

Таблица 2

Сочетания нагрузок и граничных условий при расчете танка-контейнера модели Т11

	Вариант расчета				
	1	2	3	4	5
Поперечные связи	Во всех нижних фитингах				
Вертикальные связи					
Продольные связи	В двух нижних фитингах с неударной стороны	В двух нижних фитингах с ударной стороны	Во всех нижних фитингах	В двух нижних фитингах по диагонали танка-контейнера	
Продольная нагрузка	–	В двух нижних фитингах с ударной стороны	–	–	

Согласно скриншотам видеозаписи с высокой частотой кадров, в момент удара контейнера-цистерны фитинги с ударной стороны приподнимаются над площадкой фитингового упора, при этом вся нагрузка передается на дальние фитинги (рис. 8).

В рамках проводимой работы, на полигоне ИЦ ЖТ «СЕКО» проведены натурные испытания с целью анализа поведения танка-контейнера на платформе при ударе. Для регистрации напряжений, возникающих в конструкции танка-контейнера, оборудовался тензорезисторами. Схема расположения тензорезисторов приведена на рис. 10.

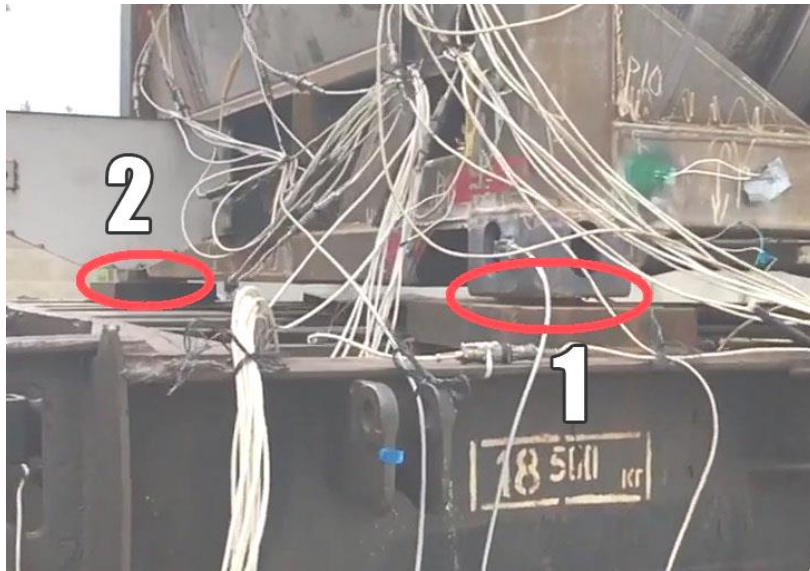


Рисунок 8. Поведение танка-контейнера в момент удара

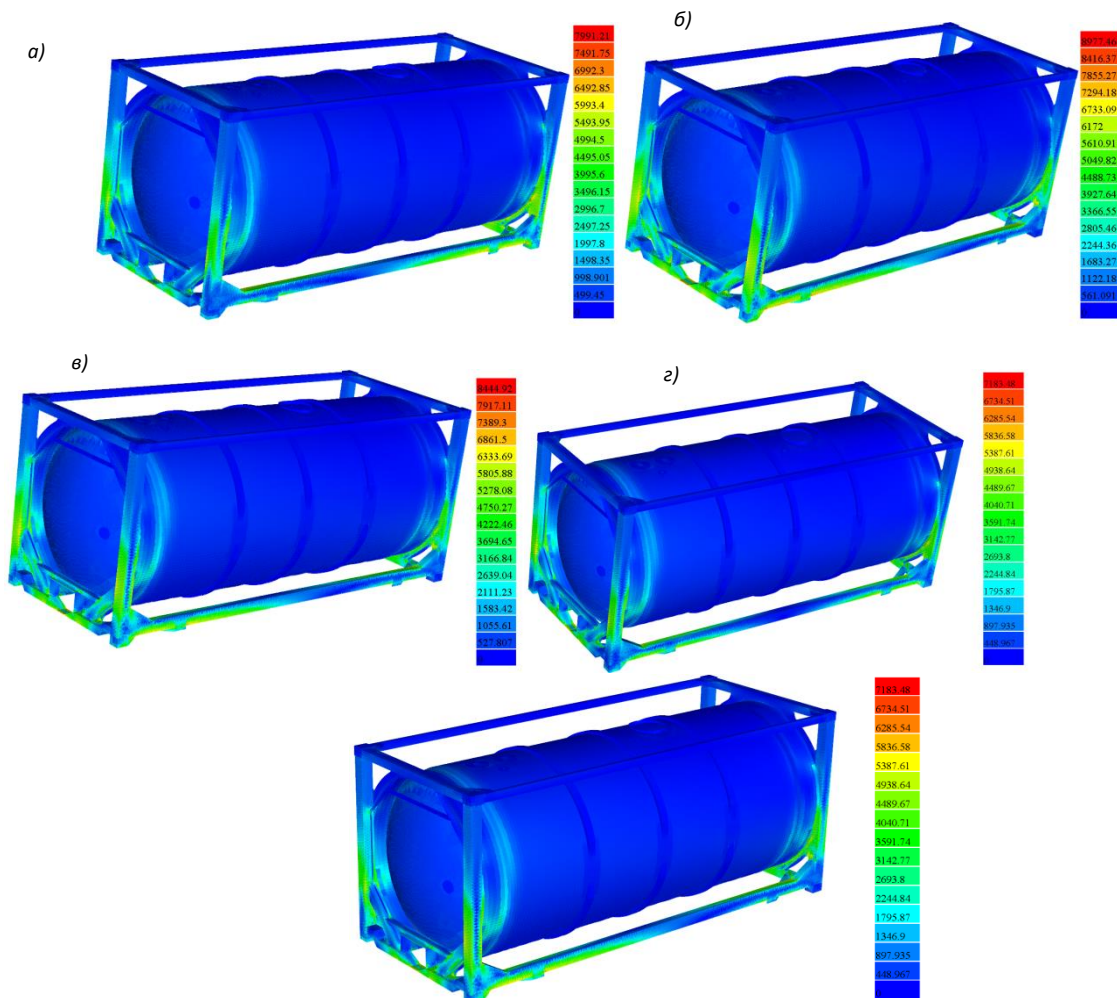


Рисунок 9. Распределение эквивалентных напряжений в танке-контейнере
a – первый вариант расчета; *б* – второй вариант расчета; *в* – третий вариант расчета;
г – четвертый вариант расчета; *д* – пятый вариант расчета

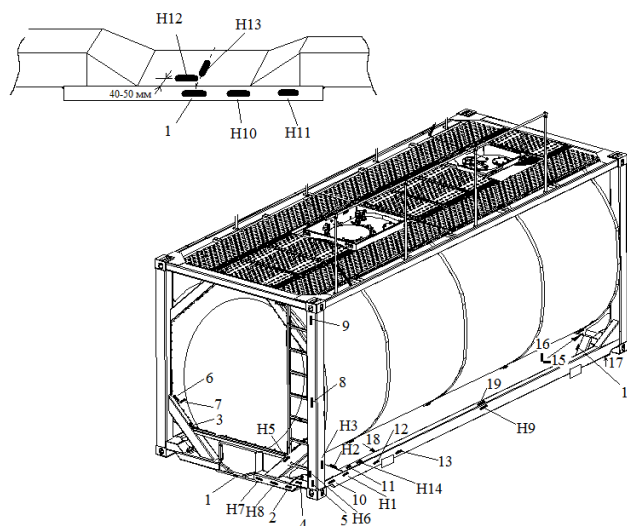


Рисунок 10. Расположение тензорезисторов на контейнере-цистерне

Величины эквивалентных напряжений в характерных точках (рис. 5) контейнера-цистерны модели Т-11 при многовариантном расчете конечно-элементной модели с различным сочетанием нагрузок и граничных условий и результаты эксперимента приведены на рис. 11.

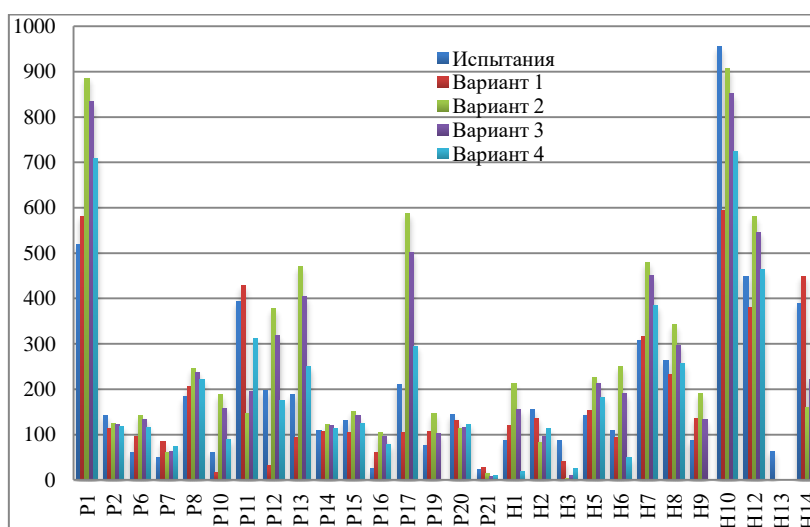


Рисунок 11. Гистограмма эквивалентных напряжений в контейнере, МПа

Выводы:

1. В ходе проведения серии расчетов, отличающихся величиной дискретизации конечно-элементной сетки, было выявлено, что для получения достаточно точной величины возникающих напряжений в элементах конструкции важную роль играет правильность разбиения геометрической модели танка-контейнера конечными элементами. Использование крупной сетки приводит к получению заниженных значений напряжений. При уменьшении размера конечного элемента в 4,5 раза с образованием 70810 степеней свободы, значения напряжений могут увеличиваться на 20% в

одном и том же узле. Это, в свою очередь, может оказывать влияние на правильность принимаемых технических решений на этапе проектирования контейнеров-цистерн, а впоследствии может отразиться и на результатах дорогостоящих натуральных испытаний.

2. Выявлено значительное влияние размера конечного элемента на величину напряжений особенно в наиболее опасных сечениях конструкции. В зонах с отсутствием концентрации напряжений изменение размера конечного элемента не оказывает существенного влияния на величину напряжений.

3. Для практических расчетов конструкций танков-контейнеров, получения удовлетворительных результатов рекомендуется использовать в расчетной модели средний размер конечного элемента как треугольного, так и четырехугольного в конструкции рамы со стороной ~30 мм, а для котла ~60 мм.

4. Проведенная серия расчетов конечно-элементной модели танка-контейнера с различными вариантами нагрузок и закрепления, а также натуральный эксперимент показали, что возникающие напряжения в элементах рамы в одном и том же месте могут меняться на величину 50%. Поэтому на стадии проектирования, при оценке прочности танков-контейнеров необходимо проводить серию расчетов с различными вариантами граничных условий и нагрузок.

5. В условиях эксплуатации железнодорожным транспортом и при действии продольных ударных нагрузок контейнер ведет себя по-разному на платформе, что ведет к перераспределению напряжений в конструкции контейнера. При проведении прочностных расчетов на стадии проектирования необходимо это учитывать.

6. Методика проведения испытаний на удар нуждается в корректировках, т.к. по требованиям Регистра [1] условие прочности по построенной кривой СУО выполняется, однако возникающие при этом напряжения в раме превышают предел текучести. Поэтому необходимо параллельно с испытаниями проводить тензометрирование, чтобы выявлять слабые стороны конструкции.

Библиографический список

1. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам : межгос. стандарт. – Введ. 2016–07–01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 54 с.

2. Общие положения по техническому наблюдению за контейнерами. Правила изготовления контейнеров. Правила допущения контейнеров к перевозке грузов под таможенными печатями и пломбами. Правила технического наблюдения за изготовлением контейнеров. Правила технического наблюдения за контейнерами в эксплуатации. НД 2-090201-009. С-Пб.: Российский морской регистр судоходства, 2015.

Шероховатость поверхности после окраски

Пегашкин В. Ф., докт. техн. наук
Боршова Л. В., канд. техн. наук, доц.
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Определено влияние различных факторов на величину шероховатости окрашенной поверхности стальных и алюминиевых образцов с различной исходной шероховатостью. С увеличением исходной шероховатости интенсивность влияния толщины лакокрасочного покрытия на величину шероховатости окрашенной поверхности уменьшается. Установлено, что для получения требуемой шероховатости поверхности на готовых (окрашенных) изделиях исходную шероховатость на металле можно получать как минимум на класс ниже. Это позволит повысить режимы резания и ресурс работы режущего инструмента на операциях механической обработки соответствующих поверхностей, что при массовом производстве даст значительный экономический эффект.

Ключевые слова: покрытие, шероховатость поверхности.

Среди факторов, влияющих на аэродинамические характеристики летательных аппаратов (ЛА), важное место занимает шероховатость наружной поверхности. Наличие шероховатости приводит к значительному увеличению сопротивления трения аппарата о воздух на траектории полета. Вариация высоты микронеровностей в значительных пределах приводит к увеличению разброса скорости полета (рис. 1, 2).

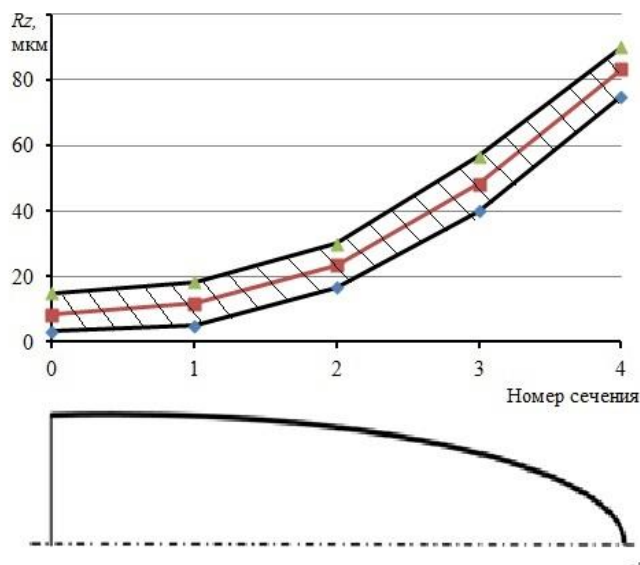


Рисунок 1. Изменение шероховатости по поверхности обтекателя ЛА (среднее значение и диапазон вариации)

Зависимость шероховатости обработанной поверхности (величины микронеровностей) от режимов резания приведены в любой справочной литературе и учебниках [1–3].

Величина шероховатости поверхностей устанавливается чертежом изделия только после механической обработки. Так как поверхности дета-

лей покрывают пятью слоями лакокрасочного покрытия общей толщиной 50...80 мкм, шероховатость поверхностей уменьшается.

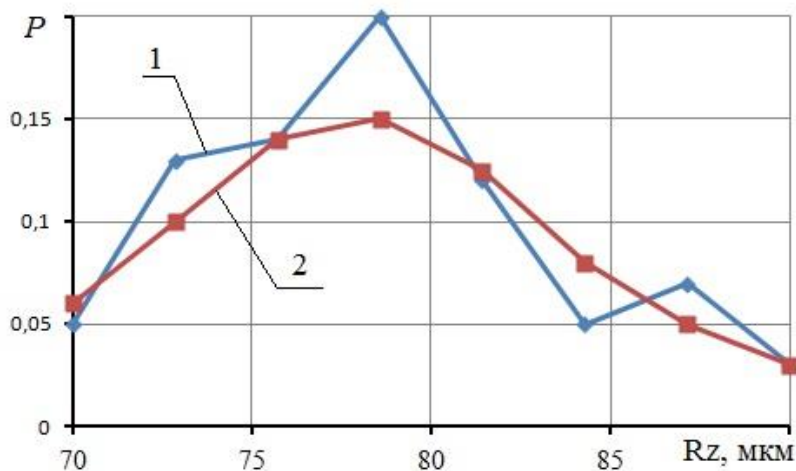


Рисунок 2. Распределение высоты микронеровности поверхности ЛА в сечении 4:
1 – практическое, 2 – нормальное

Чтобы определить влияние различных факторов на величину шероховатости окрашенной поверхности, покрытие наносилось на стальные и алюминиевые образцы с различной исходной шероховатостью. Схема на несения покрытия и режимы его сушки соответствовали технологическому процессу окраски изделий: грунтовка и эмаль наносились пневмораспылением на предварительно обезжиренные поверхности. Шероховатость поверхности и толщину покрытия измеряли на микроскопах МИС-11 и инструментальном.

По результатам измерений были получены семейства кривых зависимостей шероховатости окрашенной поверхности $Rz_{от}$ толщины покрытия h и исходной шероховатости поверхности Rz_0 (рис. 3), которые можно аппроксимировать функцией вида

$$Rz = Rz_0 b^{-h},$$

где b – коэффициент, величина которого определяется на основе метода наименьших квадратов.

$$b = \exp \frac{\sum_1^n \frac{Rz_i}{Rz_0} h_i}{\sum_1^n h_i^2},$$

где h_i и Rz_i – соответственно, i -е значение толщины лакокрасочного покрытия и величины шероховатости поверхности после нанесения i -го слоя.

Расчеты показали, что величина коэффициента b зависит от исходной шероховатости поверхности (рис. 4).

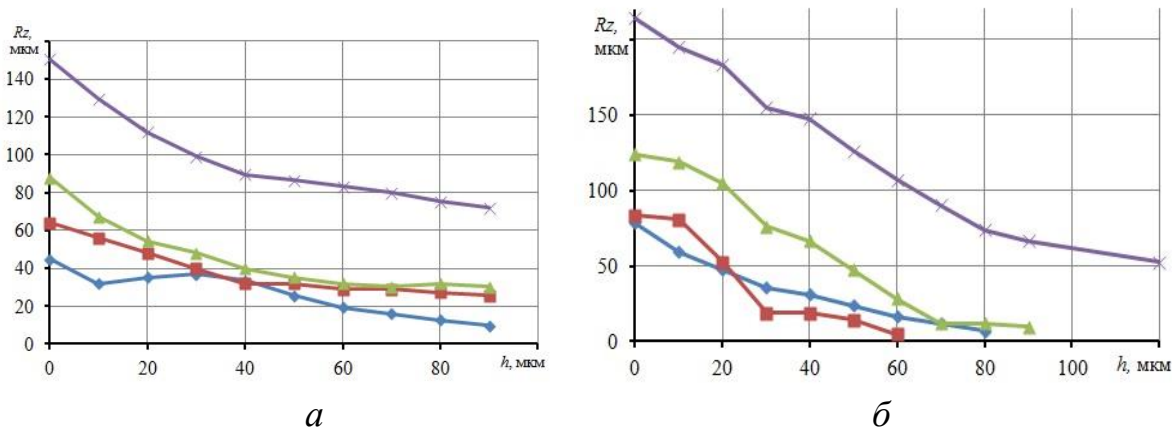


Рисунок 3. Зависимость шероховатости поверхности от толщины покрытия при разных исходных шероховатостях ($h = 0$): образцы стальные (а) и алюминиевые (б)

С увеличением Rz_0 интенсивность влияния толщины лакокрасочного покрытия на величину шероховатости окрашенной поверхности уменьшается. Корреляционный анализ показал, что для алюминиевых деталей зависимость коэффициента b от исходной шероховатости в исследуемой области, с достаточной степенью точности, можно аппроксимировать линейной функцией, поэтому зависимость $Rz = f(h, Rz_0)$ приобретает вид

$$Rz = Rz_0(1,0544 - 1,4 \times 10^{-4} Rz_0)^{-h}.$$

Приведенные зависимости позволяют прогнозировать шероховатость поверхностей деталей после нанесения лакокрасочных покрытий.

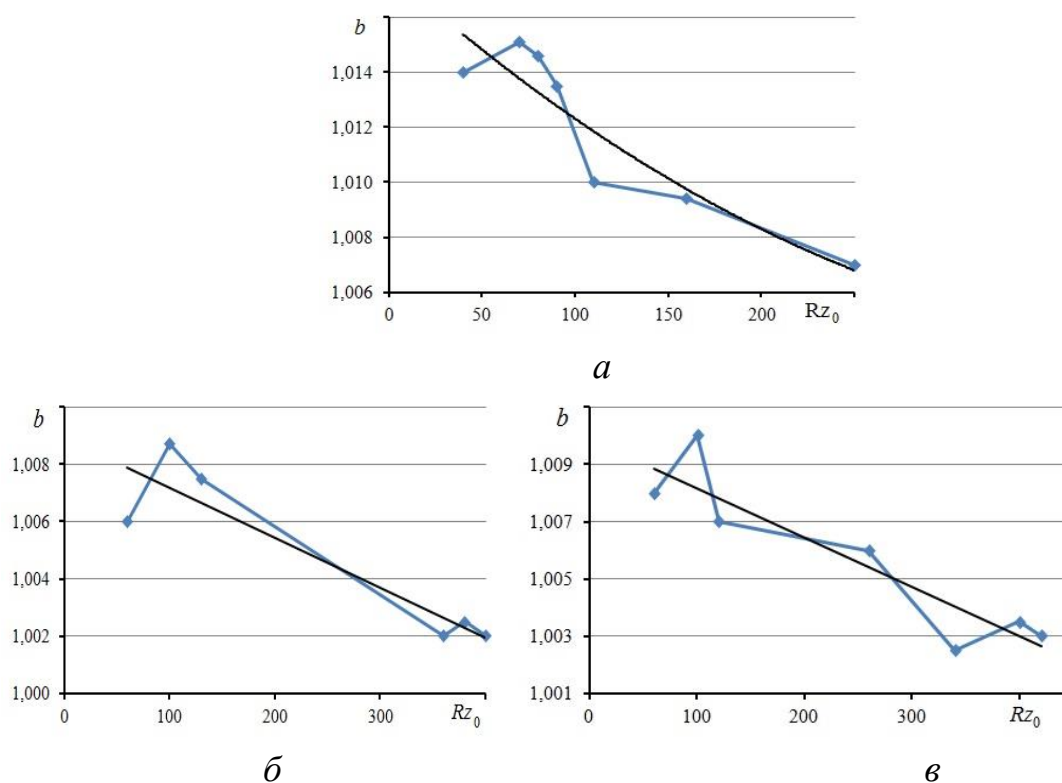


Рисунок 4. Зависимость величины коэффициента b от исходной шероховатости для стальных (а) и алюминиевых (б, в) образцов без предварительной грунтовки (а, б) и с грунтовкой (в)

Установлено, что для получения требуемой шероховатости поверхности на готовых (окрашенных) изделиях исходную шероховатость на металле можно получать как минимум на класс ниже. Это позволит повысить режимы резания и ресурс работы режущего инструмента на операциях механической обработки соответствующих поверхностей, что при массовом производстве даст значительный экономический эффект.

Библиографический список

1. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения. – М. : Машиностроение, 1969. – 559.
2. Медведев Д. Д. Автоматизированное управление процессом обработки резанием. – М. : Машиностроение, 1980. – 87 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. Малова А. Н. – М. : Машиностроение, 1972. – 532 с.

Нелинейная аппроксимация переменной глубины резания

Пегашкин В. Ф., докт. техн. наук
Пегашкина Е. В., доц.
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Рассмотрено моделирование процедур формирования параметров качества при механической обработке деталей на металлорежущих станках. Показано, что эксплуатационные свойства деталей создаются не только на финишных операциях – они формируются на протяжении всего технологического процесса. При этом некоторые характеристики и свойства наследуются от операции к операции – копирование погрешностей формы заготовки на обработанную деталь в виде одноименной погрешности. В частности нелинейности заготовки соответствует нелинейность детали. Исследована степень пооперационного копирования нелинейности – биения поверхности вала в среднем сечении. Разработана математическая модель наследования этой погрешности с учетом нелинейной аппроксимации изменения глубины резания по окружности заготовки (за один оборот детали).

Ключевые слова: деформация при обработке, непрямолинейность, технологическая система.

В нежестких технологических системах изменение упругих деформаций системы вызывает значительные отклонения формы обработанной поверхности. В стационарном, установившемся режиме работы оборудования при обработке деталей небольших габаритов погрешности, определяемые упругими деформациями технологической системы, являются доминирующими. Упругие деформации технологической системы от действия силы резания приводят к появлению как погрешности размеров, так и погрешности формы обрабатываемой детали. Последняя является следствием деформации в двух следующих случаях [1]:

- когда погрешность заготовки неодинакова в различных участках ее поверхности (например, некруглая или коническая заготовка);

- когда жесткость системы изменяется на протяжении одного прохода резца (погрешность в продольном сечении) или одного оборота заготовки (погрешность в поперечном сечении).

Кроме того, возможен еще один случай, когда заготовка имеет погрешность взаимного расположения поверхностей, например эксцентricность. Рассмотрим подробнее каждый из перечисленных случаев.

При разработке технологического процесса необходимо иметь в виду, что эксплуатационные свойства деталей создаются не только на финишных операциях – они формируются на протяжении всего технологического процесса. При этом некоторые характеристики и свойства переходят от операции к операции, они как бы наследуются от предыдущей операции [2]. Наглядным примером, подтверждающим влияние технологической наследственности на точность, обработки может служить копирование погрешностей формы заготовки на обработанную деталь в виде одноименной погрешности (овальности заготовки соответствует овальность детали, конусообразности – конусообразность и т. д.).

Степень пооперационного копирования погрешностей обычно выражают через коэффициент уточнения [2, 3]:

$$K_y = \frac{\Delta_3}{\Delta_d},$$

где Δ_3 – погрешность заготовки; Δ_d – погрешность детали.

Этот коэффициент позволяет оценить технологические возможности операции по увеличению точности детали независимо от вида и величины погрешностей.

Известно, что в жестких технологических системах, когда жесткость детали больше жесткости станка, происходит уменьшение погрешности от операции к операции, в нежестких технологических системах погрешности заготовки могут полностью копироваться на детали.

Влияние отрицательных наследственных свойств на конечные характеристики обрабатываемых деталей должно быть либо устранено, либо ограничено. Поэтому технологической наследственностью следует управлять, назначая такие условия обработки на операциях, которые гарантировали бы получение детали с требуемой точностью.

Одной из существенных погрешностей для валов малой жесткости является непрямолинейность продольной оси. Для того чтобы определить пути уменьшения этой погрешности, необходимо знать механизм ее образования и изменения по ходу технологического процесса.

На рис. 1 показано изменение непрямолинейности детали типа «вал» (биение в среднем сечении) (*a*) и коэффициента уточнения (*b*) по ходу технологического процесса. Видно, что коэффициента уточнения уменьшается при переходе от черновых операций к чистовым. То есть наибольшее уменьшение погрешности заготовки происходит на черновых операциях. Дальнейшая обработка не вносит существенного уменьшения.

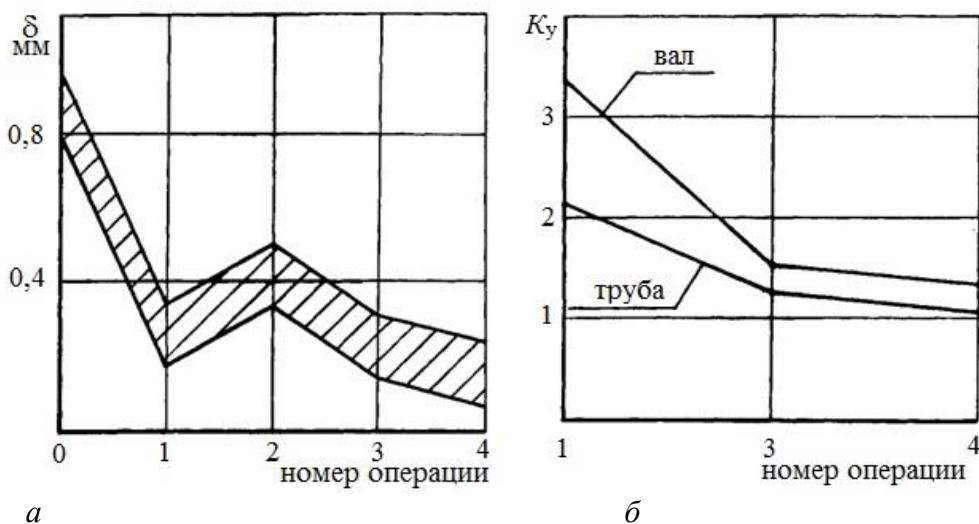


Рисунок 1. Изменение непрямолинейности детали типа «вал» (биение в среднем сечении) (а) и коэффициента уточнения деталей типа «вал» и «труба» (б) по ходу технологического процесса:
операции: 1 – черновая, 2 – термообработка, 3 – получистовая, 4 – чистовая

Определим причины этого явления. Деформация технологической системы с линейной упругой характеристикой при статической нагрузке определяется по известной формуле

$$y = \frac{P}{j}, \quad (1)$$

где j – жесткость технологической системы.

В качестве силы, действующей на технологическую систему в процессе обработки, целесообразно отдать предпочтение составляющей силы резания P_y потому, что действие этой составляющей оказывает наибольшее воздействие на точность обработки [4].

С учетом деформации системы

$$P = P_y = Cv^u s^z (t_3 - y)^x, \quad (2)$$

где y – величина деформации системы; t_3 – заданная глубина резания.

Погрешности детали – отклонение от прямолинейности продольной оси – определим эксцентриситетом e среднего сечения детали относительно оси, соединяющей центры сечений концов деталей (рис. 2, а). Таким образом, схему образования погрешности детали можно представить в следующем виде – рис. 2, б.

В результате смещения центра сечения заготовки a относительно оси вращения z на величину e_3 припуск по окружности сечения располагается неравномерно. Следовательно, и деформация технологической системы также будет неравномерна по окружности. В результате после обработки получаем профиль детали B с центром среднего сечения – б.

Изменение заданного припуска по окружности зададим уравнением

$$t_3 = t + f(\omega) \quad (3)$$

где t – среднее значение глубины резания; $f(\omega)$ – переменная величина глубины резания в функции угла поворота.

На рис. 3 показана схема определения закона изменения t_3 . Из треугольника

$$t = R - r_d, \quad R = \sqrt{r_3^2 + e_3^2 - 2r_3e_3 \cos c}, \quad c = 180 - \omega - b, \quad b = \sin^{-1}\left(\frac{e_3}{r_3} \sin \omega\right).$$

На рис. 4 приведены результаты расчета изменения t_3 по углу поворота детали (■). Видно, что закон изменения близок к синусоидальному.

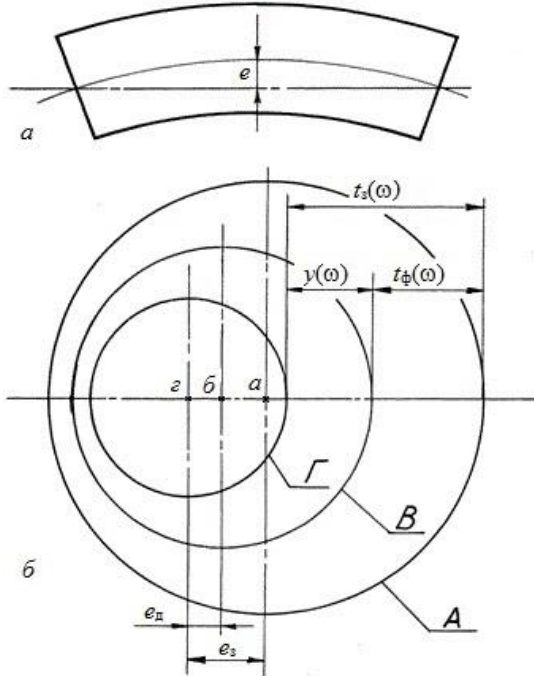


Рисунок 2. Схема определения погрешности в продольном (а) и поперечном (б) сечениях

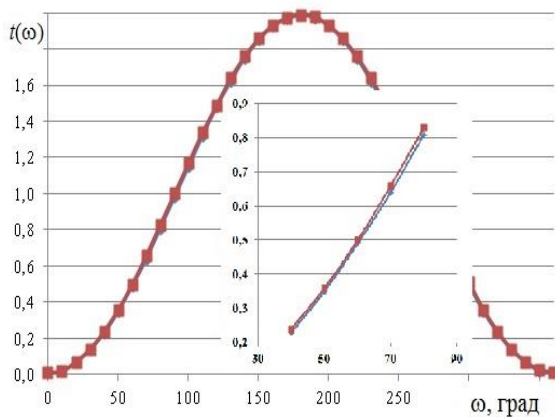


Рисунок 4. Изменение глубины резания по углу поворота: ■ – расчетная величина, ◆ – аппроксимация

Аппроксимируем переменную величину глубины резания синусоидальной функцией вида

$$f(\omega) = e_3 \sin(\omega).$$

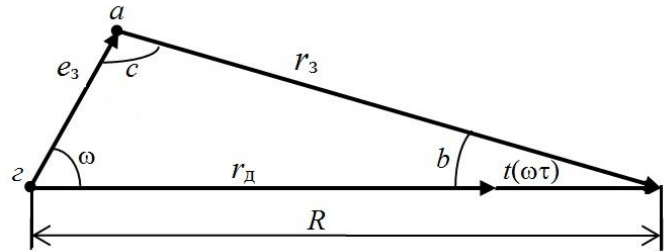


Рисунок 3. Схема определения закона изменения t_3 : z – ось вращения детали при обработке (ось шпинделя), a – ось заготовки, e_3 – эксцентриситет заготовки относительно оси вращения, r_3 – радиус заготовки, r_d – радиус детали, R – расстояние от центра вращения до наружной поверхности заготовки, ω – угол поворота детали (шпинделя)

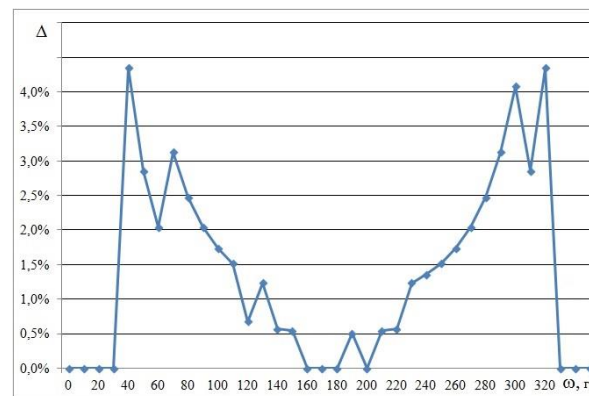


Рисунок 5. Изменение погрешности аппроксимации (Δ) по углу поворота

На рис. 4 представлены результаты аппроксимации (♦). Видно, что две кривые практически накладываются друг на друга (во врезке приведен фрагмент графиков в увеличенном масштабе). Наибольшая погрешность аппроксимации не превышает 4,5 % (рис. 5).

Следовательно, зависимость (3) можно представить в виде

$$t_3 = t + e_3 \sin(\omega) \quad (4)$$

где e_3 – эксцентриситет заготовки; ω – частота вращения; t – время.

Подставляя уравнение (4) в (1), получим

$$P_y = CV^{-u} S^z [t + e_3 \sin(\omega) - y]^x. \quad (5)$$

Разложим выражение (5) в ряд Маклорена относительно y и $e_3 \sin(\omega t)$. Учитывая только линейные члены, получим

$$P_y = CV^{-u} S^z [t^x + x t^{x-1} e_3 \sin(\omega) - x t^{x-1} y]. \quad (6)$$

Как показали расчеты, погрешность линеаризации функции (5) в области возможных значений y и $e_3 \sin(\omega t)$ при любых возможных значениях v, s, t не более 7,5 %.

После подстановки (6) в (1) получаем уравнение

$$y = \frac{CV^{-u} S^z t^x}{j + xCV^{-u} S^z t^{x-1}} + \frac{xCV^{-u} S^z t^{x-1} e_3}{j + xCV^{-u} S^z t^{x-1}} \sin(\omega).$$

Таким образом, под действием переменной силы резания вследствие переменного припуска по окружности детали в системе возникает изменение деформации

$$y_2(\omega) = \frac{xCV^{-u} S^z t^{x-1} e_3}{j + xCV^{-u} S^z t^{x-1}} \sin(\omega),$$

относительно среднего положения

$$y_1 = \frac{CV^{-u} S^z t^x}{j + xCV^{-u} S^z t^{x-1}}.$$

Амплитуда колебания определит погрешность детали. С учетом того, что $j \gg xCV^{-u} S^z t^{x-1}$ получим

$$e_D = \frac{xCS^z t^{x-1} e_3}{jv^u}.$$

Отсюда коэффициент уточнения определится как

$$K_y = \frac{jv^u}{xCS^z t^{x-1}}. \quad (7)$$

Из зависимости (7) видно, что с увеличением жесткости технологической системы и скорости резания коэффициент уточнения подачи уменьшается. Влияние глубины резания зависит от показателя степени x (рис. 6).

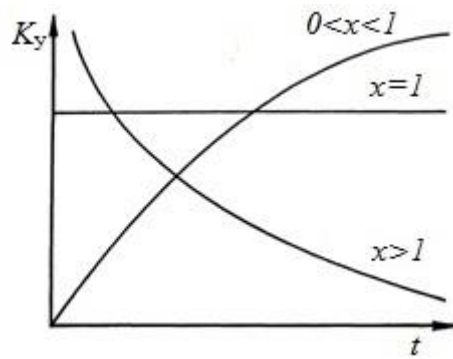


Рисунок. 6. Характер зависимости коэффициента уточнения от глубины резания при различных x

При $0 < x < 1$ показатель степени при t меньше нуля и с увеличением глубины резания возрастает коэффициент уточнения.

При $x > 1$ влияние уровня на K_y обратное. При $x = 1$ коэффициент уточнения не зависит от глубины резания.

Для существующих инструментальных материалов показатель степени x при глубине резания в формуле силы резания P_y находится в пределах $0,7 \dots 0,9$ [5, 6] (диапазон $0 < x < 1$). Поэтому при переходе от черновых операций с большими глубинами резания к чистовым с малыми глубинами коэффициент уточнения уменьшается.

Увеличение K_y с ростом глубины резания отмечается, например, в работе [7]. Автор объясняет этот факт тем, что с увеличением значения t технологическая система как бы приспособливается, адаптируется к измененным условиям обработки в сторону повышения коэффициента уточнения. Однако проведенный анализ показывает, что если бы существовал инструментальный материал, для которого $x > 1$, то при обработке таким инструментом увеличение глубины резания приводило бы к уменьшению коэффициента уточнения.

Библиографический список

1. Соколовский А. П. Научные основы технологии машиностроения. – М. – Л. : Машгиз, 1955. – 197 с.
2. Медведев Д. Д. Автоматизированное управление процессом обработки резанием. – М. : Машиностроение, 1980. – 87 с.
3. Маталин А. А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов. – Л. : Машиностроение, 1970. – 143 с.
4. Колев К. С., Горчаков Л. М. Точность обработки и режимы резания. – М. : Машиностроение, 1976. – 96 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя /под ред. Малова А. Н. – М. : Машиностроение, 1972. – 532 с.
6. Вильсон А. Л., Этин А. О. Исследование режущих свойств минералокерамики ВОК-60 при точении // Станки и инструмент. – 1978. – № 12. – с. 23–24.

Определение деформаций технологической системы при обработке деталей переменного по длине профиля

Пегашкин В. Ф., докт. техн. наук
Старостин А. П.
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Рассмотрено моделирование процедур формирования параметров качества при механической обработке деталей на металлорежущих станках. В нежестких технологических системах изменение упругих деформаций системы по длине вызывает значительные отклонения формы обработанной поверхности. Деформация технологической системы при базировании детали постоянного по длине профиля определяется по известным зависимостям, в которые момент инерции детали входит как постоянная величина. Для вала переменного по длине профиля момент инерции изменяется по длине – по координате приложения силы резания. Проведен анализ применения различных методов расчета деформации детали круглого сечения переменного профиля. Предложен метод расчета, основанный на методе замены ступенчатого вала на гладкий с произвольным диаметром и приложением дополнительных поперечных сил и крутящих моментов и интегрального уравнения изогнутой оси балки. Показано, что наиболее близкие к действительности результаты при обработке вала в центрах дают расчеты предложенным методом, который в отличие от определения деформации решением дифференциального уравнения изогнутой оси балки третий метод универсален. При этом погрешность расчета не превышает 10 %.

Ключевые слова: деформация при обработке, переменный профиль, технологическая система.

Технология механической обработки деталей наряду с обычными приемами включает приемы и способы достижения заданного уровня качества, основанные на управлении упругодеформированным состоянием заготовок в процессе их обработки, что особенно эффективно при обработке нежестких деталей. Управление упругим деформированием заготовок и оптимизация параметров этого процесса позволяют достичь заданный уровень качества при сохранении высокой производительности.

В нежестких технологических системах изменение упругих деформаций системы по длине вызывает значительные отклонения формы обработанной поверхности.

Деформация технологической системы (y) при базировании детали постоянного по длине профиля определяется по известной зависимости [1]

$$y = P_y \left[\frac{x^2(l-x)^2}{3EJ} + \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \omega_{ПБ} + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \omega_{ЗБ} + \omega_C, \right] \quad (1)$$

где x – координата силы по длине детали от передней бабки; l – длина детали; J – момент инерции детали ($J = 0,048d^4$, d – диаметр детали); E – модуль упругости материала детали; $\omega_{ПБ}$, $\omega_{ЗБ}$, ω_C – податливости соответственно передней бабки, задней бабки и суппорта; μ – коэффициент динамичности.

В приведенной зависимости момент инерции детали входит как постоянная величина. Если же вал имеет переменный профиль, то и момент инерции изменяется по длине вала (рис. 1).

Следовательно, для определения отклонения формы вала от заданной чертежом в случае обработки вала переменного профиля необходимо определить методы расчета деформации технологической системы при переменном по длине вала моменте инерции. Возможно применение следующих методик.

Во-первых, можно заменить ступенчатый вал на гладкий с приведенным диаметром, который рассчитывается по формуле [2]

$$d_{\text{пр}} = \frac{\sum d_i l_i}{\sum l_i},$$

где d_i – диаметр i -й ступени вала, l_i – длина i -й ступени вала.

Далее на основании формулы (1) и приведенного диаметра рассчитывается деформация технологической системы.

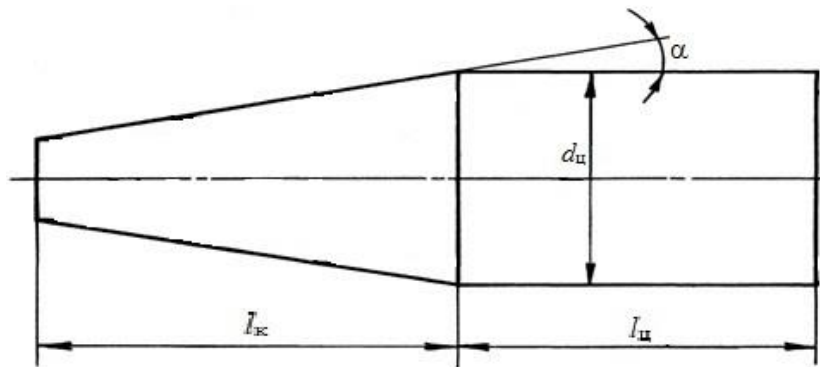


Рисунок 1. Типовая деталь

Во-вторых, возможно определить деформацию детали на основе дифференциального уравнения изогнутой оси балки [1]

$$EJ(x) \frac{d^2 y}{d^2 x} = M(x),$$

где E – модуль упругости материала детали, $J(x)$ – момент инерции поперечного сечения вала в функции длины, $M(x)$ – изгибающий момент, действующий на вал, в функции длины.

Задавая зависимости изменения момента инерции и изгибающего момента по длине детали, решая это уравнение, получим уравнение для определения деформации технологической системы. Так, например, для вала, состоящего из двух участков – цилиндрического и конического (рис. 1) уравнения имеют вид [3]:

для конического участка:

$$y(x) = -\frac{10}{3} \times \frac{Pd_0(d_0 + 2l\text{tg}\alpha)}{IE(2\text{tg}\alpha)^4(d_0 + 2x\text{tg}\alpha)} + 20 \frac{Pd_0(d_0 + l\text{tg}\alpha)}{E(2\text{tg}\alpha)^4(d_0 + 2x\text{tg}\alpha)} + 20 \frac{P}{IE(2\text{tg}\alpha)^4} \times \ln \frac{(d_0 + 2x\text{tg}\alpha)}{2\text{tg}\alpha} + C_1 x + C_2,$$

для цилиндрического участка:

$$y(x) = \frac{10Px^3(2l-x)}{6IEd_u^4} + C_3x + C_4.$$

Постоянные интегрирования C_1, C_2, C_3, C_4 определяются из начальных условий и из условия равенства деформаций на стыке первого и второго участков.

Этот метод при расчете деформации технологической системы дает достоверные результаты, однако, недостатком метода является то, что для каждого нового профиля детали необходимо задавать функцию $J(x)$ и, следовательно, результирующие зависимости будут иметь другой вид в каждом конкретном случае. Кроме того, при базировании в патроне с поджимом задним центром значительно усложняется зависимость для определения $M(x)$.

В третьих, возможно применение другого метода. Для определения деформации технологической системы при обработке вала переменного по длине профиля преобразуем деталь в ступенчатый вал (рис. 2). В работах [4, 5] даны методики расчета деформации ступенчатых валов при базировании в центрах без учета деформации опор, т.е. в качестве расчетной схемы была принята установка балки на шарнирные жесткие опоры. Однако в производстве не менее распространенным является базирование вала в патроне с поджимом задним центром. В этом случае в качестве расчетной схемы принимается жесткая заделка с шарнирной опорой – статически неопределимая система.

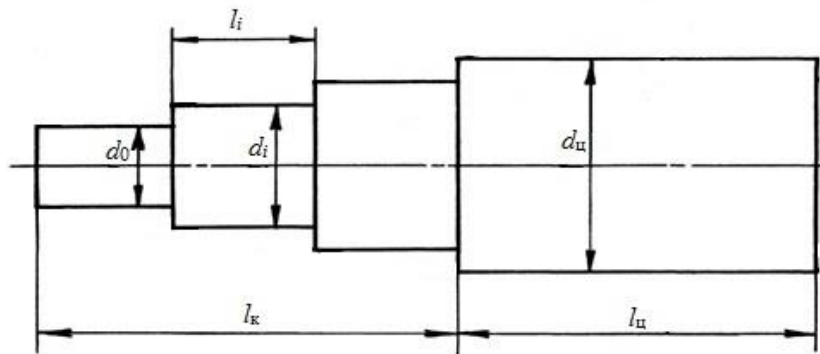


Рисунок 2. Преобразование вала (рис. 1) в ступенчатый

По методу Жемочкина Б.Н. [6] заменим ступенчатый вал на гладкий с произвольным диаметром d (рис. 3).

Для сохранения эквивалентности упругой линии исходного ступенчатого вала и упругой линии вновь полученного вала на последний накладываются дополнительные силы и моменты, а исходная нагрузка и реакции опор умножаются на коэффициенты приведения.

$$K_1 = \frac{J}{J_1}; \quad K_2 = \frac{J}{J_2}; \quad \dots \quad K_n = \frac{J}{J_n}; \quad K_i = \frac{J}{J_i},$$

где J и J_i – моменты инерции соответственно эквивалентного вала и ступеней исходного вала.

Дополнительные силы и моменты определяются по формулам (табл. 1).

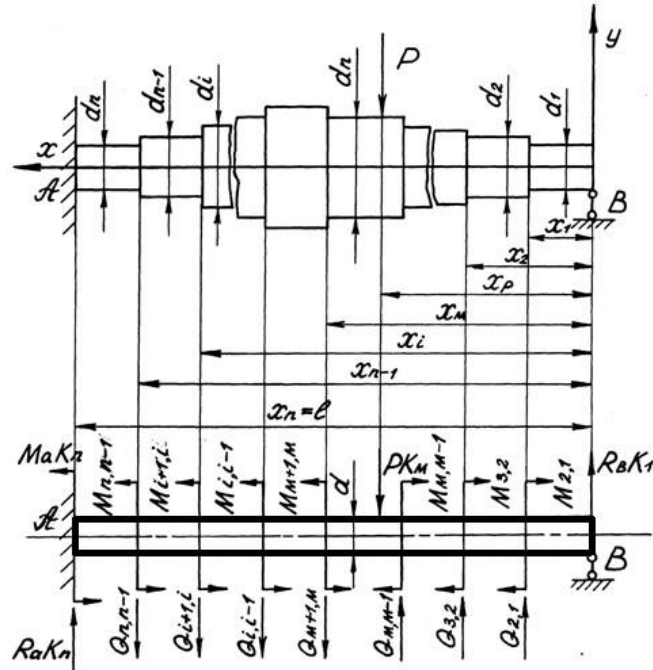


Рисунок 3. Схема преобразования вала

Таблица 1

Формулы для определения дополнительных сил и моментов

Диапазон i	Формула
$1 \leq i \leq m - 1$	$\begin{cases} Q_{i, i+1} = R_b (K_{i+1} - K_i) \\ M_{i, i+1} = R_b (K_{i+1} - K_i) x_i \end{cases}$
$m \leq i \leq n - 1$	$\begin{cases} Q_{i, i+1} = R_a (K_{i+1} - K_i) \\ M_{i, i+1} = R_a (K_{i+1} - K_i) (l - x_i) - M_a (K_{i+1} - K_i) \end{cases}$

где R_a и R_b – реакции опор; M_a – момент в заделке.

Деформацию технологической системы можно представить в виде суммы

$$Y(x) = Y_D(x) + Y_C(x),$$

где $Y_D(x)$ – деформация детали в расчетном сечении; $Y_C(x)$ – деформация опор, приведенная к расчетному сечению.

Для определения u_d запишем интегральное уравнение изогнутой оси балки

$$EJ y_D = EJ y_0 + EJ \varphi_0 x + \sum_{i=1}^n P_i \frac{(x-a_i)^2}{2!} + \sum_{i=1}^n M_i \frac{(x-b_i)^3}{3!} + \sum_{i=1}^n Q_i \frac{(x-c_i)^4}{4!}$$

где Y_D – деформация вала в искомом сечении; y_0, φ_0 – деформация и угол поворота вала в начале координат; x – координата расчетного сечения; a_i, b_i, c_i – координаты моментов, сосредоточенных и распределенных сил.

Очевидно, что для рассматриваемого случая

$$\sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n M_{i,i+1}; \quad \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n Q_{i,i+1} \quad \sum_{i=1}^n q_i = 0.$$

Тогда

$$\begin{aligned} EJy_{\text{д}} = & EJy_0 + EJ\phi_0 x + R_0 \sum_{i=1}^n (K_{i+1} - K_i) \left[\frac{x_i(x-x_i)^2}{2} + \frac{(x-x_i)^3}{6} \right] + \\ & + R_a \sum_{i=m}^{n-1} (K_{i+1} - K_i) \times \left[\frac{(1-x_i)(x-x_i)^2}{2} + \frac{(x-x_i)^3}{6} \right] - \\ & - R_b K_1 \frac{x^3}{6} - PK_m \frac{(x-x_i)^3}{6} - M_a \sum_{i=m}^{n-1} (K_{i+1} - K_i) \frac{(x-x_i)^3}{6}. \end{aligned}$$

Деформация и угол поворота в начале координат определяются из начальных условий ($x=0$; $y_{\text{д}}=0$; $x=l$; $y_{\text{д}}=0$).

Отсюда угол поворота в начале координат

$$\begin{aligned} EJ\phi_0 = & -\frac{1}{l} \left[R_b \sum_{i=1}^{m-1} (K_{i+1} - K_i) \left(\frac{l^3}{6} - \frac{lx_i^2}{2} + \frac{x_i^3}{3} \right) + R_a \sum_{i=m}^{n-1} (K_{i+1} - K_i) \frac{(l-x_i)^3}{3} - \right. \\ & \left. - R_b K_1 \frac{l^3}{6} - PK_m \frac{(l-x_p)^3}{6} - M_a \sum_{i=m}^{n-1} (K_{i+1} - K_i) \frac{(l-x_i)^2}{2} \right] \end{aligned}$$

Реакции в опорах и момент в заделке можно определить, раскрывая статистическую неопределенность схемы базирования. Проводя преобразования, получим зависимость для определения деформации вала в точке приложения силы ($x = x_p$)

$$\begin{aligned} y_{\text{д}}(x_p) = & -\frac{l^3}{3EJ} \left\{ \left(1 - \frac{x_p}{l} \right) R_b \left[\sum_{i=1}^{m-1} (K_i - K_{i+1}) \frac{x_i^3}{l^3} + \frac{3M_a}{2Rl_b^3} \times \right. \right. \\ & \times \sum_{i=1}^{n-1} (x_i^2 - x_p l) (K_{i+1} - K_i) + K_m \frac{P}{R_b} \frac{x_p^2}{l^2} \left. \right] + \\ & \left. + R_a \frac{x_p}{l} \sum_{i=m}^{n-1} (K_{i+1} - K_i) \left(1 - \frac{x_i}{l} \right) \right\}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} M_a = & P \left[1 - \frac{(1-x_p)^2(2l+x_p)}{2l^3} - x_p \right] \\ R_a = & P \left[1 - \frac{(1-x_p)^2(2l+x_p)}{2l^3} \right], \\ R_b = & \frac{P(1-x_p)^2(2l+x_p)}{2l^3}. \end{aligned}$$

Учитывая, что $K_i = J/J_i$ и принимая для сплошного вала $y_i = 0,05d_i^4$, получим

$$y_D(x_P) = -\frac{l^3}{0,15E} \left\{ R_b \left(1 - \frac{x_P}{l} \right) \left[\sum_{i=1}^{m-1} \frac{x_i^3}{l^3} \left(\frac{1}{d_i^4} - \frac{1}{d_{i+1}^4} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{3M_a}{2R_b l^3} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i^2 - x_P l) \cdot \left(\frac{1}{d_{i+1}^4} - \frac{1}{d_i^4} \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{P}{R_b} \frac{x_P^2}{l^2 d_m^4} \right] + R_a \frac{x_P}{l} \sum_{m-1}^{n-1} \left(1 - \frac{x_i}{l} \right)^3 \left(\frac{1}{d_{i+1}^4} - \frac{1}{d_i^4} \right) \right\}.$$

Перемещение детали в расчетном сечении от деформации опор из несложных геометрических построений и преобразований можно определить как

$$y_c(x_P) = -\frac{P}{2l^4} \left[\frac{(l-x_P)^2(l-x_P)(2l+x_P)}{j_b} + x_P \frac{2l^3 - (l-x_P)^2(2l+x_P)}{j_a} \right].$$

Отсюда получим

$$y(x_P) = -\frac{Pl^3}{0,15E} \left\{ \left(1 - \frac{x_P}{l} \right) \left[\frac{(l-x_P)^2(2l+x_P)}{2l^3} \times \right. \right. \\ \times \sum_{i=1}^{m-1} \frac{x_i^3}{l^3} \left(\frac{1}{d_i^4} - \frac{1}{d_{i+1}^4} \right) + \frac{3[2l^3 - (1-x_P)^2(2l+x_P) - 2l^2 x_P]}{4l^5} \times \\ \left. \left. \times \sum_{i=1}^{m-1} (x_i^2 - x_P l) \left(\frac{1}{d_{i+1}^4} - \frac{1}{d_i^4} \right) + \frac{x_P^2}{l^2 d_m^4} \right] + \right. \\ \left. + \frac{2l^3 - (1-x_P)^2(2l+x_P)}{2l^4} x_P \times \sum_{m-1}^{n-1} \left(1 - \frac{x_i}{l} \right)^3 \left(\frac{1}{d_{i+1}^4} + \frac{1}{d_i^4} \right) \right\} \\ - \frac{P}{2l^4} \left[\frac{(l-x_P)^2(l-x_P)(2l+x_P)}{j_b} + x_P \frac{2l^3 - (l-x_P)^2(2l+x_P)}{j_a} \right]. \quad (2)$$

Зависимость (2) дает возможность определить деформацию технологической системы при обработке деталей типа тел вращения любого профиля при установке в патроне с поджимом задним центром. На рис. 4 проведено сравнение различных методик расчета с экспериментальными данными.

Видно, что наиболее близкие к действительности результаты при обработке вала в центрах дают расчеты по первому и третьему методам. Однако в отличие от определения деформации решением дифференциального уравнения изогнутой оси балки третий метод универсален.

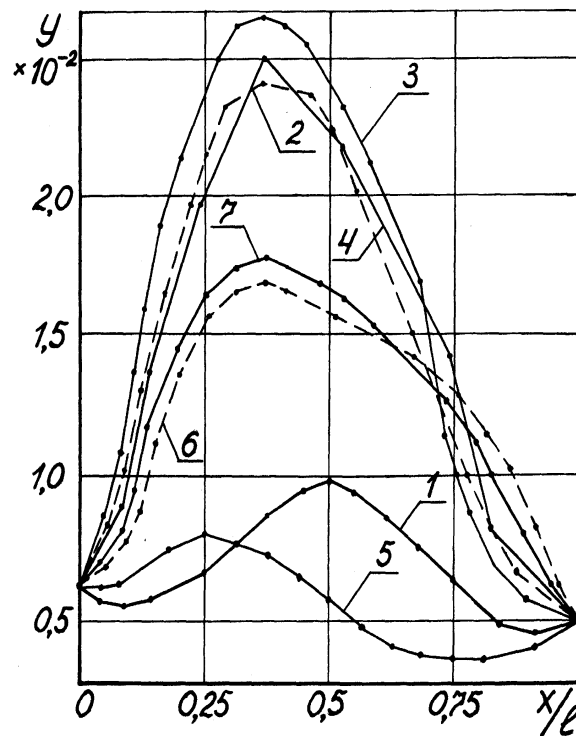


Рисунок 4. Деформация детали по длине, рассчитанные:
 1 – по методике [2] при базировании в центрах,
 2 – по формуле (2) при базировании в центрах,
 3 – по методике [4], 4 – практическая при базировании в центрах,
 5 – по методике [2] при базировании в патроне и заднем центре,
 6 – практическая при базировании в патроне и заднем центре,
 7 – по формуле (2) при базировании в патроне и заднем центре

Библиографический список

1. Беляев Н. М. Соппротивление материалов. – М. : Наука, 1976. – 547 с.
2. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения. – М. : Машиностроение, 1969. – 559.
3. Пегашкин В. Ф. Динамические деформации технологической системы при токарной обработке детали типа «вал» малой жесткости / В.Ф. Пегашкин, А.Б. Лысых // Уральский гос. технический университет.- 1988.- Деп. в М:ЦНИИ МАШ. N ДР-392. 1983.
4. Васильевых Л. А. Универсальная зависимость для определения прогибов ступенчатых валов / Л. А. Васильевых и др. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1975. – № 5. – с. 67–69.
5. Васильевых Л. А. Определение прогибов ступенчатых валов / Л.А. Васильевых и др. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 1976. – № 11. – с. 73–75.
6. Пономарев С. Д. Расчеты на прочность в машиностроении. – М. : Машгиз, 1956. – 136 с.

Методические основы определения коэффициента запаса сопротивления усталости при натуральных испытаниях подвижного состава

Сенько В. И., д-р техн. наук, профессор

Макеев С. В., канд. техн. наук

Комиссаров В. В., канд. техн. наук, доц.

ИЦ ЖТ «СЕКО», БелГУТ, г. Гомель, Республика Беларусь

Целью данной статьи является обобщение методических основ определения коэффициента запаса сопротивления усталости при испытаниях подвижного состава на этапе определения соответствия опытных образцов требованиям нормативных документов, а также рассмотрение направлений совершенствования используемых методик.

Ключевые слова: подвижной состав, испытания, коэффициент запаса сопротивления усталости, прочность.

На протяжении всей истории развития железнодорожного транспорта наблюдаются тенденции по повышению скорости движения и объема перевозок, усложнению условий эксплуатации, совершенствованию конструктивных форм несущих элементов, использованию новых конструкционных материалов и технологий изготовления, развитию методов и методик испытаний подвижного состава. В конечном итоге для удовлетворения все возрастающих потребностей заказчиков по скорости и объемам доставки грузов, а также по своей специализации подвижной состав должен постоянно модернизироваться, а в некоторых случаях и полностью меняться примерно каждые десять-пятнадцать лет. При этом разработка и реализация крупномасштабных проектов в области транспорта, в условиях сокращения этапов проектирования и модернизации, требует принципиально новых постановок проблемы обеспечения надежности и комплексной безопасности проектируемых и эксплуатируемых машин, конструкций и механизмов с учетом потенциальной опасности объектов инфраструктуры и возможных крупномасштабных ущербов от техногенных аварий [2]. Даже несмотря на современное развитие теорий и методов расчета на прочность, жесткость, устойчивость и надежность, случаются неожиданные разрушения, которые приводят к серьезным авариям, а порой и к катастрофам. В тоже время принятые нормы и методы проектирования, а также применение при расчете усталостной долговечности назначенного γ -процентного ресурса приводит к тому, что наработка реальных объектов подвижного состава до предельного состояния значительно выше установленных (нормативных) значений. Это ведет к значительному недоиспользованию заложенных в них при проектировании и производстве индивидуальных резервов.

В конечном итоге для объективной оценки безопасной работы подвижного состава требуется применение все более совершенных норм и правил обоснования работоспособности [1–3], что возможно только на основе более точного прогнозирования и подтверждения ресурса (расхода ресурса) объектов железнодорожного транспорта в зависимости от условий и режимов эксплуатации [8, 9].

В настоящее время «Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных)» [6] (далее Нормы) являются нормативной основой для обеспечения надежности вагонов железных дорог колеи 1520 мм и необходимых их динамических качеств с точки зрения безопасности движения. В соответствии с данным документом, а также ГОСТом [7] основной характеристикой работоспособности длительно работающих несущих конструкций железнодорожных вагонов является усталостная прочность, характеризующуюся соответствующим коэффициентом запаса. При его значениях, выше установленных норм подразумевается, что в течение всего времени эксплуатации вагона возникновение усталостных трещин в металле принципиально невозможно.

Основы методики расчетно-экспериментальной оценки сопротивления усталости конструкций подвижного состава

Выводы об усталостной прочности несущих конструкций железнодорожных вагонов в соответствии с предъявляемыми требованиями производятся с учетом вероятностного рассеивания характеристик сопротивления усталости детали (расчетные и определяемые параметры необходимо рассматривать как случайные величины и проводить вероятностные расчеты по теоретическим или экспериментальным кривым плотности вероятности) и случайного характера динамического нагружения, возникающего в условиях эксплуатации или соответствующих испытаний.

В данном случае нормирован [6, 7] и широко применяется метод расчета, основанный на условии суммирования повреждений и уравнения кривой усталости. При этом используется достаточно распространенная в расчетной практике гипотеза линейного суммирования повреждений Пальмгрена-Майнера, в соответствии с которой условие разрушения (повреждение $D_p = 1$) при дискретном и произвольном изменении нагрузки имеет вид:

$$D_p = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \text{ или } D_p = \int_0^{\infty} \frac{dn_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

где n_i – число циклов нагружения при заданном напряжении σ_i (наработка);

N_i – число циклов до разрушения образца при заданном напряжении σ_i (устанавливается по левой ветви кривой усталости);

i – число уровней нагружения.

Таким образом, усталостное повреждение определяется как относительная долговечность, т.е. отношение наработки к циклической долговечности при заданном уровне напряжений.

При известной функции $f(\sigma_i)$ плотности распределения амплитудных значений напряжений в детали число циклов повторения напряжений будет

$$dn_i = T_{np} f_3 f(\sigma_i) d\sigma_i, \quad (2)$$

где T_{np} – срок службы конструкции до разрушения при непрерывной работе (движении) вагона;

f_3 – эффективная средняя частота изменения динамических напряжений;

$f(\sigma_i)$ – функция плотности распределения амплитудных значений напряжений.

Принимая степенное уравнение кривой усталости

$$\sigma_i^m N_i = \sigma_{aN}^m N_0, \quad (3)$$

получают выражение амплитуды установившегося, эквивалентного эксплуатационному, режима нагружения детали

$$\sigma_{a,\varepsilon} = \sqrt[m]{\sum_1^{k_{vi}} T_{np} p_{vi} f_{\varepsilon vi} \int_0^{\infty} \frac{\sigma_i^m f(\sigma_i) d\sigma_i}{N_0}}, \quad (4)$$

или, в случае дискретного распределения амплитудных значений напряжений

$$\sigma_{a,\varepsilon} = \sqrt[m]{\frac{T_{np}}{N_0} \sum_1^{k_{vi}} p_{vi} f_{\varepsilon vi} \sum_1^{k_{\sigma i}} \sigma_i^m p_{\sigma i}}, \quad (5)$$

где σ_{aN} – предел выносливости (предельная амплитуда) конструкции (детали), соответствующий базовому числу циклов N_0 ;

σ_i – амплитуда напряжений (данного разряда) от эксплуатационных нагрузок;

$p_{\sigma i}$ и p_{vi} – соответственно частота (вероятность) появления напряжения с уровнем σ_i в данном интервале скоростей и доля времени, приходящаяся на эксплуатацию вагона со скоростью v_i ;

$k_{\sigma i}$ и k_{vi} – число разрядов дискретизации соответственно амплитуд напряжений и диапазона скоростей движения;

$f_{\varepsilon i}$ – частота изменения динамических напряжений, характерная для данной скорости;

m – показатель степени в уравнении кривой усталости.

Эффективную (центральную) частоту изменения динамических напряжений для каждого интервала скоростей определяют из осциллограмм напряжений по выражению

$$f_3 = \frac{x_i}{t_i}, \quad (6)$$

где x_i – количество измеренных амплитуд напряжений на i -й осциллограмме (с учетом «нулевых» значений);

t_i – продолжительность записи на i -й осциллограмме (с);

i – номер реализации (осциллограммы),

или по формуле

$$f_3 = \sqrt{\int_0^{\infty} f^2 g(f) df}, \quad (7)$$

где $g(f)$ – нормированная функция спектральной плотности.

При отсутствии экспериментальных данных эффективную частоту процесса изменения динамических напряжений допускается определять по формуле

$$f_3 = \frac{a}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{f_{ст}}}, \quad (8)$$

где a – коэффициент, принимаемый в зависимости от типа подвижного состава;

g – ускорение свободного падения;

$f_{ст}$ – статический прогиб рессорного подвешивания груженого вагона, м.

По определенному эквивалентному $\sigma_{a,э}$ значению амплитуды напряжений в конструкции и предельной амплитуде $\sigma_{a,N}$ напряжений (пределу выносливости соответствующему определенной вероятности неразрушения) проверяют усталостную прочность проектируемого узла или детали по формуле

$$n = \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_{a,э}} \geq [n], \quad (9)$$

где $[n]$ – минимально допустимое значение коэффициента запаса сопротивления усталости, принимаемое в зависимости от исходных данных проводимого расчета.

При использовании надежных экспериментальных данных о режимах эксплуатационной нагруженности и прочностных характеристиках детали с учетом вероятностного рассеивания допустимые коэффициенты запаса принимаются в диапазоне от 1,3 до 1,7. Наличие приближенных данных о прочности детали или режимах ее нагруженности требует использования значений коэффициентов запаса от 1,5 до 1,9. Использование же приближенных данных о прочности детали и режимах ее нагруженности обязывает использовать повышенные значения коэффициентов запаса от 1,8 до 2,2 [6, 7].

Если проектируемое или сертифицируемое изделие является ответственной деталью подвижного состава, то для нее принимают большие значения коэффициентов запаса усталости. Так, например, при одних и тех же исходных данных для элементов кузова будет принят коэффициент запаса равный 1,5, а для колесной пары – 1,9.

Величину среднего значения предельной амплитуды напряжений (предела выносливости) $\bar{\sigma}_{a,N}$ узлов и деталей устанавливают, проводя испытания на стендах динамического нагружения в условиях близких к эксплуатационным (несимметричный цикл изменения напряжений, правильное приложение нагрузок и опорных реакций и т.п.). При отсутствии экспериментальных данных она может быть получена из выражения:

$$\bar{\sigma}_{a,N} = \frac{\bar{\sigma}_{-1}}{(k_{\sigma})_k}, \quad (10)$$

где $\bar{\sigma}_{-1}$ – среднее (медианное) значение предела выносливости гладкого стандартного образца из материала (по ГОСТ 25.502) при симметричном цикле изменения напряжений на базе N_0 ;

$(\bar{k}_{\sigma})_k$ – среднее значение общего коэффициента снижения предела выносливости в выбранной контрольной зоне (или детали), определяемого по соответствующим экспериментальным и справочным данным.

Расчетное значение предела выносливости материала конструкции $\sigma_{a,N}$, соответствующее определенной вероятности не разрушения, для контрольной зоны (детали) при симметричном цикле напряжений определяется по формуле

$$\sigma_{a,N} = \bar{\sigma}_{a,N} \cdot (1 - z_p \cdot v_{\sigma_{a,N}}), \quad (11)$$

где z_p – квантиль распределения $\sigma_{a,N}$, соответствующий односторонней вероятности (например, при $P = 95 \%$, $z_p = 1,645$);
 $v_{\sigma_{a,N}}$ – коэффициент вариации предела выносливости материала по [6].

Величины амплитуд динамических напряжений, полученные в результате натурного эксперимента при несимметричном цикле нагружения, приводятся к эквивалентному симметричному циклу по следующей формуле:

$$\sigma_a = \sigma_a^{\text{эксп}} + \sigma_m \cdot \frac{\sigma_{a,N}}{\sigma_B}, \quad (12)$$

где σ_a – амплитуда динамического напряжения приведенная к симметричному циклу и эквивалентная экспериментально полученному несимметричному;
 $\sigma_a^{\text{эксп}}$ – амплитуда экспериментально полученного несимметричного цикла;
 σ_m – среднее напряжение цикла в контрольной зоне экспериментально полученного несимметричного цикла;
 σ_B – значение предела временного сопротивления материала в контрольной зоне.

В качестве исходных данных об эксплуатационной нагруженности, характерной для нормальной работы вагона в движущемся поезде и отражающей современные условия эксплуатации и на будущую перспективу по III расчетному режиму согласно Норм ... [6] следует принимать случай движения вагона в составе поезда по прямым и кривым участкам пути и стрелочным переводам с допускаемой скоростью вплоть до конструкционной при периодических служебных регулировочных торможениях, периодических умеренных рывках и толчках, штатной работе механизмов и узлов вагона. Реализация данного воздействия может быть смоделирована в результате проведения ходовых прочностных и динамических испытаний. На рис. 1 в качестве примера показана осциллограмма изменения напряжений в контрольной точке при проведении таких испытаний. Полученные при ходовых испытаниях результаты анализируют, корректируют и получают информацию, характеризующую условия нагружения испытываемой детали (узла) за весь срок ее службы.

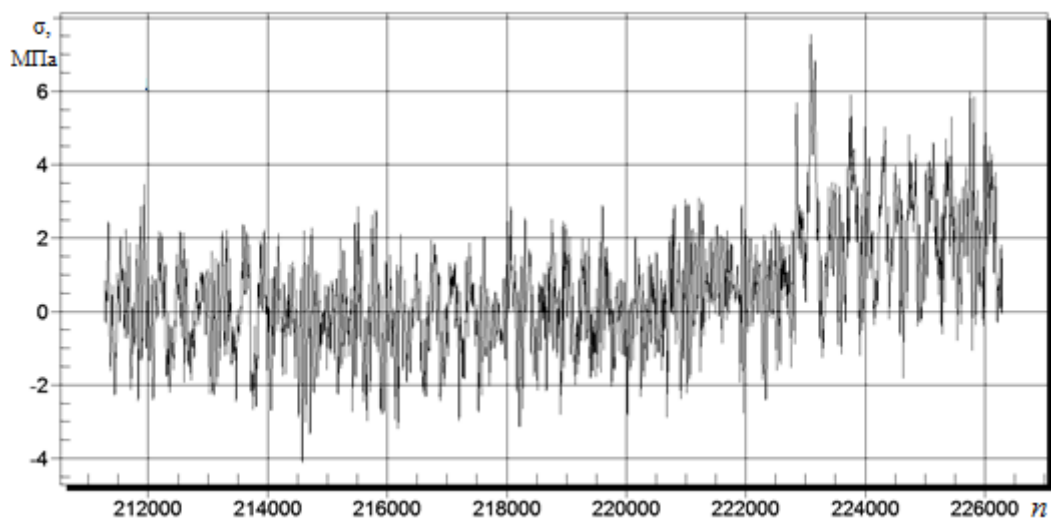


Рисунок 6. Осциллограмма напряжений в контрольной точке при ходовых испытаниях

С другой стороны, осуществление такого рода воздействий можно воспроизвести ускоренно, проведя испытания вагона на соударение (рис. 2) и «сбрасывание» с клиньев (рис. 3), так как действующие силы можно принять независимыми друг от друга.

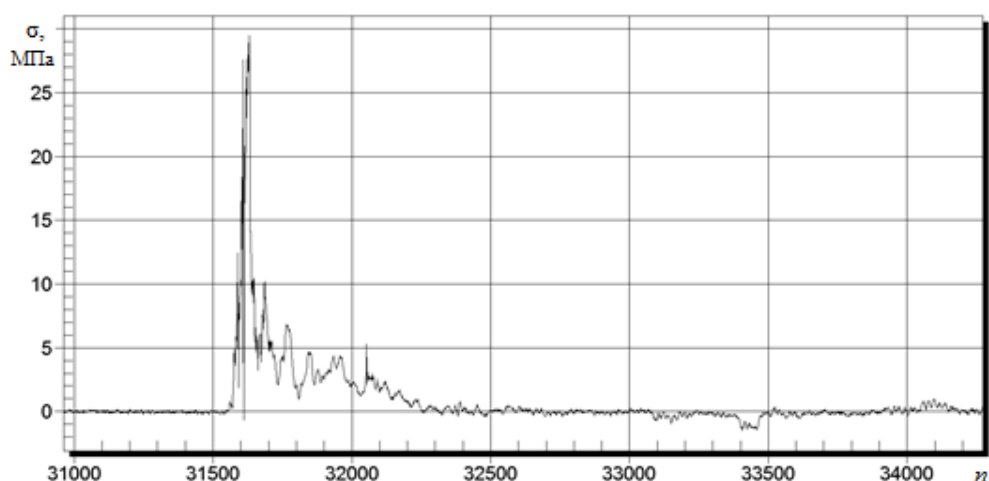


Рисунок 7. Осциллограмма напряжений в контрольной точке при испытаниях на соударение

Ударные испытания грузовых вагонов, при которых продольные ударные силы прикладываются к раме вагона через автосцепку, проводят с целью определения динамических напряжений и их распределения в элементах рамы и кузова вагона, при его эксплуатации. Испытания на соударения выполняются путем соударения вагона-бойка и испытуемого вагона с использованием специализированного механизированного стенда-горки или с использованием локомотива на прямом участке пути.

При испытаниях по сбросу с клиньев производится сбрасывание грузового вагона с клиньев (при укладке клиньев определенной высоты под все колеса исследуемого вагона) с измерением динамических напряжений, возникаю-

щих в конструкции и определением коэффициентов вертикальной динамики, соответствующих различным режимам вертикального динамического нагружения.

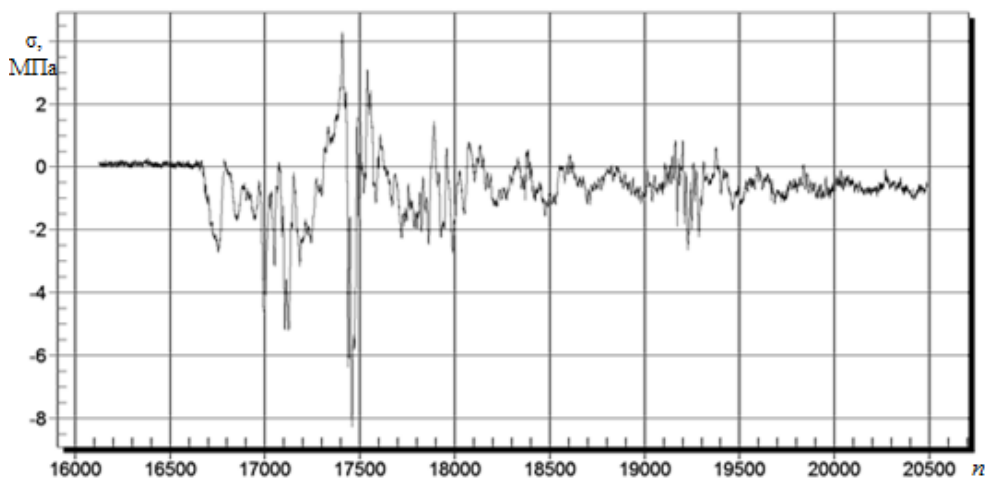


Рисунок 8. Осциллограмма напряжений в контрольной точке при сбросе с клиньев

В данном случае эквивалентную амплитуду динамического напряжения (формулы 4 и 5) можно определить по формуле

$$\sigma_{a,э} = \sqrt[m]{\frac{T_{пр}}{N_0} (D_{прод}^{сум} + D_{верт}^{сум})}, \quad (13)$$

где $D_{прод}^{сум}$ – суммарное повреждение от продольных нагрузок;

$D_{верт}^{сум}$ – суммарное повреждение от вертикальной динамики.

В свою очередь суммарное повреждающее воздействие от продольных нагрузок определяют по формуле

$$\sigma_{прод}^{сум} = N_{c1} \sum_{i=1}^{k_{уд}} (\sigma_{a,i}^I)^m \cdot P_i^I, \quad (14)$$

где N_{c1} – нормативное количество циклов динамических напряжений от продольных сил, действующих на вагон через автосцепку за 1 год эксплуатации (принимают согласно [7]);

$k_{уд}$ – принятое число диапазонов усилий;

P_i^I – частота повторения усилий в диапазоне;

$\sigma_{a,i}^I$ – амплитуда динамического напряжения для i -го диапазона сил, МПа, которую определяют по формуле

$$\sigma_{a,i}^I = \frac{\overline{\sigma_{ai}^I} \cdot \overline{F}_i}{F_{max}}, \quad (15)$$

где $\overline{\sigma_{ai}^I}$ – амплитуда напряжения несимметричного цикла при динамической нагрузке от соударения, полученная при силе соударения 3,5 МН, МПа;

\overline{F}_i – среднее значение продольного усилия, для i -го диапазона, МН.

Нормативную функцию распределения частот повторения продольных усилий, действующих на грузовой вагон через автосцепку, принимают согласно [7].

Повреждающее воздействие за 1 год эксплуатации от вертикальной динамики определяют по формуле

$$\sigma_{\text{верт}}^{\text{сум}} = N_{c2} \sum_{j=1}^3 K_j \sum_{i=1}^{k_{\sigma j}} (\sigma_{a,i}^{\text{II}})^m \cdot P_i^{\text{II}}, \quad (16)$$

где K_j – доля протяженности характерных участков пути (прямых ($j = 1$), кривых ($j = 2$) и стрелочных переводов ($j = 3$));

P_i^{II} – частота появления амплитуд с уровнем $\sigma_{a,i}^{\text{II}}$;

$k_{\sigma j}$ – принятое число диапазонов амплитуд для j -го характерного участка;

$\sigma_{a,i}^{\text{II}}$ – амплитуда динамического напряжения для i -го диапазона скорости j -го характерного участка, МПа, которую определяют по формуле

$$\sigma_{ai}^{\text{II}} = \frac{\overline{\sigma_{ai}^{\text{II}}} \cdot \overline{k_{di}}}{k_d}, \quad (17)$$

где $\overline{\sigma_{ai}^{\text{II}}}$ – амплитуда напряжения при вертикальной динамической нагрузке, полученная при коэффициенте вертикальной динамики при максимальной скорости, МПа;

$\overline{k_{di}}$ – среднее вероятное значение коэффициента динамики для i -го диапазона скоростей;

k_d – максимальное значение коэффициента динамики при максимальной скорости.

Нормативная функция распределения частот повторения коэффициентов динамики принимается равной нормативной функции распределения скоростей движения вагона согласно «Норм...» [6].

Нормативное количество циклов динамических напряжений от вертикальной динамики кузова при движении вагона за 1 год эксплуатации согласно «Норм...» определяют по формуле

$$N_{c2} = f_v \cdot T_{\text{пр}}, \quad (18)$$

Суммарное время действия динамических напряжений, вызванных колебаниями и вибрациями вагона при движении в груженом состоянии за 1 год эксплуатации, определяют по формуле

$$T_{\text{пр}} = 365 \cdot \frac{10^3 \cdot \overline{L}_c}{\overline{V}}, \quad (19)$$

где \overline{L}_c – среднесуточный груженный пробег вагона, км/сутки;

\overline{V} – средняя техническая скорость движения вагона, м/с.

Значения напряжений от веса груза определяются на основании полученных данных в результате испытаний вагона на статическую прочность. В случае отсутствия экспериментальных данных о напряжениях в

конструкции кузова и рамы вагона допускается принимать значения напряжений на основании расчета прочности, выполненного согласно «Норм...» [6] или установления на основе данных о динамических напряжениях и коэффициенте вертикальной динамики.

По результатам выполненной экспериментальной и расчетной оценки производится сравнение коэффициента запаса сопротивления усталости наиболее напряженных зон и допускаемого коэффициента запаса. При выполнении условия (9) делается вывод об обеспечении усталостной долговечности в течение назначенного (установленного) срока службы.

Основные направления совершенствования используемых методик

«Нормы...» [6] допускают применение специальных уточненных методов расчета конкретных узлов и деталей конструкций вагонов, если используются соответственно обоснованные, уточненные значения допускаемых коэффициентов запаса. В этой связи можно сформулировать следующие подходы по совершенствованию используемых методик:

1. Для специальных типов вагонов при обработке данных ходовых испытаний, а также при реализации испытаний путем сброса с клиньев, для более точного моделирования реальных условий эксплуатации, могут быть учтены повреждения, накапливаемые при погрузке-разгрузке, а также оценена поврежденность, возникающая при порожнем пробеге вагонов. В этой связи в дополнение к изложенному подходу требуется реализация соответствующих испытаний на порожнем подвижном составе и при погрузке-разгрузке, а также учет накапливаемых при этом повреждений по следующей зависимости

$$\sigma_{a,э} = \sqrt[m]{\frac{T_{пр}}{N_0} (D_{прод}^{сум} + D_{верт.г.}^{сум} + D_{верт.п.}^{сум} + D_{п.-р.}^{сум})}, \quad (20)$$

где $D_{верт.г.}^{сум}$ – суммарное повреждение от вертикальной динамики груженого вагона;

$D_{верт.п.}^{сум}$ – суммарное повреждение от вертикальной динамики порожнего вагона;

$D_{п.-р.}^{сум}$ – суммарное повреждение от погрузки-выгрузки.

2. В основу применяемого подхода положена гипотеза линейного накопления повреждений. К наиболее значительным недостаткам данной теории относится то, что она не описывает влияния очередности воздействия напряжений различных уровней и предполагает одинаковую скорость накопления повреждений при нагружении заданного уровня независимо от предыдущей истории нагружения. Однако экспериментальные данные показывают, что порядок приложения нагрузки на самом деле играет значительную роль и скорость накопления повреждений при заданном уровне нагружения является функцией истории циклического нагружения [15].

С другой стороны, результаты распределения суммы накопленного

повреждения до возникновения усталостной трещины, полученные при испытаниях различных образцов, показывают [12], что 97% испытанных образцов имеют суммарное повреждение, определенное согласно линейной гипотезе, в диапазоне от 0,5 до 2,5. Следовательно, использование гипотезы линейного суммирования (при суммарной поврежденности равной 1) может привести к завышению долговечности примерно в 2-2,5 раза.

В настоящее время нашли практическое применение и другие гипотезы. Все они носят вероятностный характер и имеют равные права на существование [16]. Поэтому определение усталостной прочности технических устройств по различным имеющимся гипотезам позволит снизить риск ошибки при определении ресурса конкретного изделия. В конечном итоге для каждого вида подвижного состава может быть применена своя гипотеза, обеспечивающая минимальные значения риска ее применения по всем возможным параметрам.

3. Значения показателя наклона левой ветви кривой усталости m по принятым методикам получают из кривых усталостей соответствующих деталей или аналогичных, а при отсутствии таковых принимают в качестве ориентировочных значения из [6, 7]. В работе [14] отмечено, что основной причиной изменения величины рассеивания результатов испытаний на усталость при изменении уровня напряжения является различный темп накопления повреждений в материалах, находящихся в разном техническом состоянии, который характеризуется коэффициентом m . С данных позиций уравнение кривой усталости (3) рассматривается как трехпараметрическое уравнение, в котором переменной величиной является также и показатель степени. В связи с этим в дополнение к существующим подходам по учету вероятностного рассеивания основных характеристик сопротивления усталости, также следует разрабатывать соответствующие подходы по учету рассеивания значений и параметра m .

4. При реализации методики ускоренных испытаний для определения динамических напряжений в контролируемых зонах подвижного состава используют нормативную функцию распределения частот повторения продольных усилий, действующих на грузовой вагон через автосцепку, и нормативную функцию распределения частот повторения коэффициентов динамики, принимаемую равной нормативной функции распределения скоростей движения вагона. Однако в силу постоянно меняющихся подходов к перевозочному процессу, формированию поездов, изменяющейся бальности пути данные используемые функции требуется постоянно актуализировать, тем самым обеспечивая более реальное моделирование существующих условий эксплуатации.

5. В работе [13] показано, что из-за рассеяния значений модуля упругости точность результатов тензометрирования, зависящих от фактического (а не нормативного) значения модуля упругости, будет недостаточно точна. Это свидетельствуют, по мнению авторов, о невозможности использования результатов тензометрирования для подтверждения соответствия

подвижного состава установленным требованиям. В этой связи в данной работе делается предложение проводить экспериментальную оценку соответствия элементов (деталей) подвижного состава путем испытаний деталей на усталость при реализации контроля только по силам.

Существенной особенностью строения любого материала является тот факт, что физико-механические свойства его локальных объемов неодинаковы. Это ведет к тому, что интегральные характеристики всех механических свойств материалов (характеризующие статическую и длительную прочность, пластичность, твердость, сопротивление усталости и трещиностойкость) имеют неконтролируемое рассеяние [17, 18]. Следовательно, данные характеристики являются случайными величинами, и описание закономерностей их рассеяния должно быть выполнено методами теории вероятностей и математической статистики. Поэтому и характеристики сопротивления усталости конкретных конструкций, полученные по силовым параметрам, также будут иметь соответствующее рассеяние.

В этой связи предлагается не заменять одни методы (условия) испытаний другими, а творчески их интегрировать с целью более объективного и достоверного анализа текущего состояния испытываемых объектов подвижного состава.

Заключение

В работе сформулированы методические основы определения коэффициента запаса сопротивления усталости при реализации ходовых и ускоренных испытаний подвижного состава. Показано, что существующие методики испытаний необходимо постоянно совершенствовать. В конечном итоге это позволит получать более достоверные данные о запасе сопротивления усталости реальных конструкций подвижного состава и тем самым проектировать подвижной состав более рационально и экономично, что позволит снижать металлоемкость изделий и риск их эксплуатации.

Библиографический список

1. Машиностроение. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов: Энциклопедия. Т. II-1. М.: Машиностроение, 2010. – 852 с.
2. Махутов, Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования / Н.А. Махутов. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.
3. Махутов, Н. А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению / Н.А. Махутов. – М. : Машиностроение, 1973. – 201 с.
4. Н.Н. Красовский. Управление динамической системой. Наука. 1985.
5. Н.Н. Красовский. Теория управления движением. Наука. 1968.
6. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М. : ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. – 352 с.
7. РД 24.050.37-95. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – М. : ГосНИИ вагоностроения, 1995. – 101 с.
8. Ксендзов В.Н. Прогнозирование остаточного ресурса деталей приводов машин / В.Н. Ксендзов, Г.А. Дыко, С.П. Мурашко // Надежность и контроль качества. – 1988. – № 10. – С. 18–24.
9. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения. – Введ. 01.07.90. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 38 с.

10. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / Болотин В.В. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
11. Вучечич, И.И. Оценка остаточного ресурса грузовых вагонов железных дорог / И.И. Вучечич, Б.А. Деркач, А.Д. Кочнов // Вестник ВНИИЖТ. – 2008. – №2. – С.14-18.
12. Гудков, А.И. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов / А.И. Гудков, П.С. Лешаков, Л. Г. Райков. – М.: Оборонгиз, 1963. – 440 с.
13. Плоткин, В.С. К вопросу совершенствования методик оценки прочности литых деталей тележек грузовых вагонов при их проектировании и испытаниях для цели подтверждения соответствия / В.С. Плоткин, А.М. Краснобаев, О.А. Краснобаев // Вестник ВНИИЖТ. – 2014. – №6. – С. 33–37.
14. Беженев, С.А. Методические аспекты проблемы оценки характеристик сопротивления усталости металлических материалов / С.А. Беженев // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – №1. – С. 27–31.
15. Карзов, Г.П. Физико-механическое моделирование процессов разрушения / Г.П. Карзов, Б.З. Марголин, В.А. Швецова. – СПб. : Политехника, 1993. – 391 с.
16. Корнилова, А.В. Определение общей долговечности и остаточного ресурса объекта по критерию многоциклового усталости / А.В. Корнилова // Безопасность труда в промышленности. – 2008. – № 1. – С. 47–51.
17. Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справочник. В 2-х т. / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский – Киев: Наук.думка, 1987. – Т. 1. – 514 с.; Т. 2. – 690 с.
18. Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 223 с.

О стабильности времени расплавления электрода как критерия навыка сварщика

Сидоров В. П., д-р техн. наук, профессор
ТГУ, г. Тольятти

Целью работы являлось определение перспективности использования стабильности времени расплавления покрытия электрода для оценки навыков и состояния сварщика. Исследована стабильность времени расплавления покрытых электродов марки ОК 53.70 у группы из десяти квалифицированных сварщиков. Разработана методика расчета времени расплавления всего покрытия при небольшом огарке. Зависимость времени расплавления электрода от тока дуги для средних значений группы сварщиков описывается с высокой точностью гиперболой. Разброс времени расплавления покрытия электрода на рекомендуемой для электродов обратной полярности дуги у сварщиков существенно отличается. Наиболее существенный разброс наблюдается при наплавке на минимальном рекомендуемом токе. Отклонения времени расплавления электрода для всей группы от среднего значения группы подчиняются нормальному закону распределения. По среднеквадратичному отклонению времени группы можно оценить существенность отклонений у каждого сварщика. Количественная оценка навыков сварщиков по предлагаемой методике совпадает с качественной оценкой учебного мастера. По результатам тестирования, для повышения индивидуализации обучения предложен подход к разбиению сварщиков на подгруппы по уровню стабильности времени расплавления электрода. Результаты наплавки на прямой полярности дуги в основном совпадают с результатами для прямой полярности. Для получения

стандартных гиперболических зависимостей, которые могут служить базой оценки навыка равномерности расплавления электрода, следует привлекать наиболее квалифицированных сварщиков.

Ключевые слова: время расплавления электрода, нормальное распределение, среднеквадратичное отклонение, навыки сварщика

Введение. Ручная дуговая сварка покрытым электродом по трудоемкости выполняемых ею работ занимает в России ведущее место с большим опережением других способов сварки плавлением. По разным оценкам доля ручной сварки составляет около 85% объемов дуговой сварки. Это подтверждается процентом аттестованных сварщиков ручной сварки в системе НАКС. Поэтому повышение квалификации сварщиков и качества выполняемых ими работ весьма актуальны.

Можно утверждать, что аттестация сварщиков является необходимым, но не достаточным условием постоянного качественного выполнения работ. Текущий неразрушающий и разрушающий контроль являются весьма затратными. Имеется потребность в периодическом и достаточно частом, недорогом контроле квалификации и физического состояния сварщика.

В настоящее время ведется подготовка к оценке профессиональных квалификаций специалистов различных уровней, в том числе в области сварки и для ее выполнения могут потребоваться новые подходы. В частности, вряд ли в этом случае следует опираться на требования к качеству сварочного шва, относящиеся к какой-либо одной группе опасных технических устройств.

Известны работы, в которых предпринята попытка сделать оценку качества шва при ручной сварке и, следовательно, квалификации сварщика более объективными [1-3]. Способ, разработанный в [1-3] предполагает оцифровку формы поверхности сварочного шва с помощью лазера и сравнение шва выполненного сварщиком с эталонным швом по предложенному критерию. Этот способ требует использования достаточно сложной и дорогой аппаратуры и участия высококвалифицированных кадров. Подход, основанный на изучении моторных навыков сварщика посредством анализа параметров сварочной дуги, исследовался в работе [4], но пока не нашел широкого применения. Поэтому остается потребность в создании методов экспресс - оценки навыков сварщика. Одним из таких методов может стать исследование стабильности времени расплавления покрытия электрода.

Методика проведения исследований. Исследования проводили в группе из 10 сварщиков, проходивших переподготовку в учебном центре на последней неделе обучения, продолжавшегося месяц. Сварщики представляли различные ремонтные предприятия и ранее были аттестованы на группу опасных технических устройств «Нефтегазодобывающее оборудование». Выполнялась наплавка в нижнем положении на стальную пластину валиков шириной 10-15 мм электродами ОК 53.70 диаметром $d_E=2,5$ мм

длиной $L=350$ мм. Для наплавки использовали источник питания Invertek 350PRO, имеющий цифровую индикацию значений тока сварки с точностью 1 А. Напряжение дуги во всех опытах находилось в пределах $U_d=19-22$ В. Использовали электрододержатель DE2300 фирмы "KURT-HAUFE" рассчитанный на электроды диаметром 2-6,3 мм. Длина оголенного участка электродов составляла $L_0=22$ мм. Наплавка выполнялась на трех токах из рекомендованного паспортом на электроды диапазона: минимальном $I_M=60$ А, среднем $I_C=72$ А и максимальном $I_B=85$ А. Наплавку на установленном токе сварщики выполняли поочередно, после чего ток изменялся. Каждый опыт на данном токе повторялся. Измеряли длину расплавленной части и огарка электронным штангенциркулем ШЦЦ-1-150-0.01 с точностью до 0.1 мм и округляли полученные значения до 1 мм. Время горения дуги измерялось секундомером СОСпр-26-2-010 с ценой деления 0.01 с. Сведения о сварщиках приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сведения о сварщиках группы

Шифр сварщика	Возраст, лет	Стаж работы, лет	Разряд	Какое учебное заведение окончил
Б	56	36	6	Курсы
В	38	17	6	Курсы
Е	44	25	5	ПТУ
З	37	18	5	ПТУ
Л1	29	10	5	ПТУ
Л2	53	29	6	Курсы
П1	26	10	5	Техникум
П2	28	10	5	Колледж
Ф	52	37	6	ПТУ
Х	43	18	5	ПТУ

Обращает на себя внимание факт, что некоторые сварщики, имея стаж от 18 до 25 лет, не имеют высшего 6-го разряда. Средний возраст сварщиков 41 год, средний стаж 21 год.

Сварщики инструктировались о необходимости максимально расплавлять покрытие электрода. При этом в ряде случаев покрытие оставалось нерасплавленным в среднем примерно на длине 10 мм. Корректировку результата (приведение) на всю длину покрытия производили следующим образом. Сначала рассчитывалась средняя скорость расплавления для длины расплавленного участка. Затем определялось время, при котором покрытие расплавилось бы полностью при условии сохранения средней скорости расплавления. Полученные два значения времени расплавления всего покрытия усреднялись и использовались для статистической оценки результатов опытов группы. Опыты проводились как для рекомендованной документацией обратной полярности дуги, так и для прямой полярности. Для каждого тока рассчитывалось среднее время расплавления покрытия всей группы t_c , отклонение времени каждого сварщика от полученного

среднего отклонения Δt_c , дисперсия S^2 , среднее квадратичное отклонение S , несмещенную дисперсию S_s^2 , несмещенное среднее квадратичное отклонение S_s и коэффициент вариации v [5].

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты опытов для обратной полярности дуги приведены в табл. 2.

Таблица 2

Время t расплавления покрытия на обратной полярности, секунд

Сварщик	1	2	3	4	5	6	7
	I=60 А	Δt_c	I=72 А	Δt_c	I=85 А	Δt_c	$\Sigma \Delta_c$
Б	83.75	2.1	67.4	0.4	57.2	0.8	3.3
В	82.5	0.8	67.45	0.5	56.4	0	1.3
Е	79.1	2.6	66.2	0.8	55.85	0.5	3.9
З	82.5	0.8	66.9	0.1	56.45	0	0.9
Л1	81.0	0.7	66.0	1.0	55.85	0.5	2.2
Л2	82.1	0.4	67.55	0.6	56.6	0.8	1.8
П1	83.1	1.4	68.0	1.0	57.7	1.3	3.7
П2	78.1	3.6	65.5	1.5	55.9	0.5	5.6
Ф	81.9	0.3	67.05	0.05	56.35	0	0.35
Х	82.85	1.16	67.85	0.85	56.4	0	2.0
Δ_c	81.69	1.52	66.99	0.68	56.37	0.44	2.64
Расчет по формуле (1)	81.59		67.22		56.24		

По всей группе минимальное время расплавления электрода на токе 60 А составило 78,1 с, максимальное 83,75 с. Разница (размах варьирования) составляет $R = 5,65$ с, что весьма существенно. На токе 85 А разница уменьшилась до $R = 1,85$ с, то есть в три раза. Отклонения от средних значений для каждого сварщика определялись по отношению к средним опытным значениям всей группы. Среднее квадратичное отклонение уменьшилось в еще большей степени с $S = 1,715$ с до $S = 0,464$ с (табл.4). Коэффициент вариации v уменьшился в 1,5 раза. Несмещенные оценки получены при уменьшении числа опытов до $n = 9$ и обозначены S_s . Таким образом, стабильность горения дуги повышается с увеличением тока. Возможно, что это связано с тем, что на производстве сварщики в большинстве случаев предпочитают вести сварку на максимальных токах и их навыки в этом случае лучше. Общими причинами нестабильности времени расплавления электродов является, скорее всего, нестабильность поддержания постоянной длины дуги и, вследствие этого, колебаний сварочного тока, приводящих к изменению скорости расплавления электродов. Этот вопрос требует дополнительного исследования путем фиксации значений мгновенных значений тока определения рабочего среднего тока дуги.

Проверка на отсев грубых погрешностей по методу вычисления максимальных относительных отклонений [5] показала, что на всех трех токах таких измерений нет.

Проверка гипотезы нормального распределения для всех трех токов проводилась по двум методикам – среднему абсолютному отклонению

(CAO) и по размаху варьирования R [5]. Для токов 60 А и 72 А проверка показала соответствие нормальному распределению по двум критериям, а для тока 85 А – только по первому критерию. Причем второй критерий находится близко к границе установленного диапазона. Значения параметров показывают уменьшение вероятности нормального распределения данных с увеличением тока дуги.

Для каждого из токов можно определить в группе трех сварщиков, у которых среднее отклонение от математического ожидания превышает несмещенное среднеквадратичное отклонение. В табл. 2 эти данные выделены жирным шрифтом и подчеркнуты. При токе 60 А это сварщики Б, Е и П2, при токе 72 А сварщики Л1, П1, П2 и при токе 85 А сварщики Б1, Л2, П1. Время ни у одного из сварщиков не вышло за пределы несмещенного среднеквадратичного отклонения на всех трех токах. Но у трех сварщиков на двух токах отклонения вышли за такие пределы. В области до несмещенного среднеквадратичного отклонения S_{Σ} при нормальном распределении должны оказываться $2/3$ всех результатов. Это положение соответствует как раз тому, что $\approx 1/3$ сварщиков вышли при каждом токе из этого предела. Вероятность того, что один и тот же сварщик в двух случаях случайно окажется вне пределов среднеквадратичного отклонения, равна $p=0,33 \cdot 0,33 \approx 0,1$. Поэтому можно считать, что сварщики, показатели которых дважды вышли за пределы среднеквадратичного отклонения попадают в «группу риска» и их переподготовке нужно уделять особое внимание. Данный подход может также использоваться при отборе сварщиков в организациях, в которых они работают, на прохождение переподготовки. Сварщики, попавшие в «группу риска» независимо по итогам переподготовки были оценены учебным мастером. Его качественная оценка совпала количественной оценкой по предлагаемой методике.

По такому же принципу можно определить лучших сварщиков среди участвующих в оценке. Наименьшие относительные отклонения на всех трех токах получились у сварщика Ф. На втором месте показатели сварщика З, у которого лучшие показатели при двух токах. Эти же сварщики оценивались учебным мастером как лучшие.

Усредненные результаты по всем сварщикам для каждого тока были проверены на соответствие гиперболическим зависимостям вида [6]

$$t = F_1 + K_1/I_d, \quad (1)$$

$$I_d = F_2 + K_2/t. \quad (2)$$

Коэффициенты F и K рассчитывались по методу наименьших квадратов с помощью компьютерной программы, приведенной в [7]. Аппроксимирующие данные приведены в последней строке табл. 2. Они показывают очень хорошую сходимость между расчетными и средними значениями времени в пределах десятых долей процента. Коэффициенты зависимости (1): $F_1 = -4.6$ с $K_1 = 5172$ А·с. Аналогичная сходимость обеспечивается и для коэффициентов зависимости (2). Поэтому зависимость (1) может ис-

пользоваться в качестве стандартной, а получать ее целесообразнее всего с помощью наиболее квалифицированных сварщиков или на автоматическом устройстве подачи электрода со скоростью по заданной программе по способу [8]. Аналогичные данные были получены для прямой полярности дуги (табл. 3).

Таблица 3

Время трасплавления покрытия на прямой полярности, секунд

Сварщик	1	2	3	4	5	6	7
	I=60 А	Δt_c	I=72 А	Δt_c	I=85 А	Δt_c	$\Sigma \Delta c$
Б1	89.5	1.41	74.8	0	62.15	1.15	2.56
В1	91.45	3.36	77.9	3.1	61.45	0.45	6.91
Е1	86.7	1.39	72.65	2.15	59.05	0.95	4.49
З1	86.75	1.34	75.6	0.8	61.25	0.25	2.39
Л1	89.75	1.66	76.6	1.8	62.85	1.85	5.31
Л2	86.1	1.99	72.25	2.55	60.4	0.6	5.14
П1	90.05	1.96	75.75	0.95	59.9	0.95	4.02
П2	86.75	1.34	71.4	3.4	60.25	0.75	5.49
Ф1	86.75	1.34	76.0	1.2	61.2	1.2	3.74
Х1	87.05	1.04	75.1	0.3	61.8	1.8	3.14
Δc	88.09	1.68	74.8	1.63	61.0	1.0	4.31
Расчет по формуле (1)	88.7		73.4		61.8		

По всей группе минимальное время расплавления электрода на токе 60 А составило 86.1 с, максимальное 91.45 с. Разница составляет 5.35 с, что почти совпадает с аналогичной разностью на обратной полярности. На токе 85 А разница уменьшилась до 3.8 с, то есть не столь значительно как на обратной полярности. Средние квадратичные отклонения оказались одинаковыми для тока 60 А и увеличились примерно в 2.5 раза на больших токах (табл. 4). Коэффициент вариации v изменился аналогично среднему квадратичному отклонению. Таким образом, стабильность горения дуги, в отличие от обратной полярности оказалась максимальной на минимальном токе. Возможно, это связано с тем, что блуждание катодного пятна по поверхности капли на электроде на малом токе меньше, чем на больших токах.

Проверка на отсев грубых погрешностей показала, что и на прямой полярности на всех трех токах таких измерений нет.

Проверка гипотезы нормального распределения для всех трех токов проводилась аналогично, как и для обратной полярности и показала приемлемость этого распределения для всех трех токов.

Для средних значений времени расплавления для каждого тока на прямой полярности также были определены коэффициенты гиперболической зависимости (1): $F_1 = -2.8$ с, $K_1 = 5489$ А·с. Сравнение расчетных и опытных данных проведено в последних строках табл. 3. Сходимость в этом случае несколько меньше, чем для прямой полярности, тем не менее,

ее следует признать хорошей. На рис.1 приведены графики, построенные по формуле (1) для обратной и прямой полярности дуги.

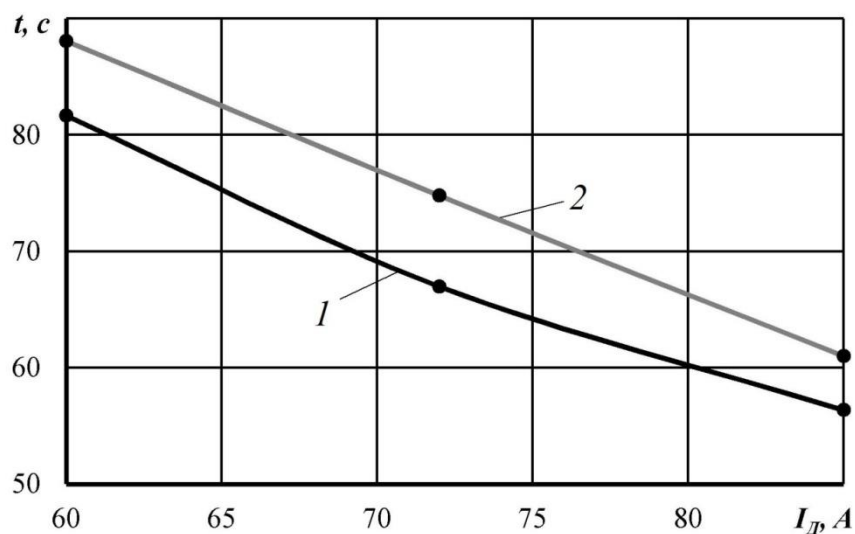


Рисунок 1. Расчетные зависимости времени расплавления покрытия от тока дуги
Электроды ОК 53.70; $d_E=2.5$ мм
1 - Обратная полярность; 2 - Прямая полярность

Таблица 4

Результаты статистической обработки данных табл. 3 и 4

Статистика	Полярность					
	Обратная			Прямая		
	Токи, А					
	60	72	85	60	72	85
t_c , с	81.69	66.99	56.37	88.09	74.8	61.0
S^2 , с ²	2.94	0.64	0.216	3.2252	3.864	1.272
S , с	1.715	0.8	0.464	1.80	1.97	1.13
Ss , с	1.906	0.889	0.516	2.0	2.19	1.26
v , %	2,1	1.2	0.8	2.0	2.6	1.9

Сравнивая результаты табл. 2 и 3 по отклонениям от средних значений, можно отметить, что они значительно равномернее распределены у сварщиков для прямой полярности. Это касается опять же только минимального тока 60 А, что подтверждает высказанное ранее предположение. Суммарное отклонение сварщиков также имеет меньший разброс по сравнению с обратной полярностью. Это можно объяснить тем, что наплавка на прямой полярности для всех них является одинаково непривычной и здесь их квалификация проявляется в меньшей степени. На необходимость специальной тренировки сварщиков для сварки на прямой полярности даже для электродов, предназначенных для этого, указано в работе [9].

Выводы

1. Разброс времени расплавления покрытия электрода на рекомендуемой обратной полярности дуги существенно отличается у разных свар-

щиков. Наиболее существенный разброс времени наблюдается при обратной полярности дуги при наплавке на минимальном рекомендуемом токе.

2. Проверка гипотезы нормального распределения по двум критериям, применяемым для небольшого числа экспериментов, показали ее применимость к полученным результатам группы сварщиков, как для обратной, так и для прямой полярности дуги.

3. Предложен подход к разбиению сварщиков на подгруппы по уровню навыка стабильности времени расплавления электрода по результатам тестирования. Качественная оценка квалификации сварщиков учебным мастером совпадает с оценкой по количественными результатами.

4. Гиперболическая зависимость времени расплавления электрода от тока дуги выполняется для средних значений группы сварщиков с высокой точностью. Для получения стандартных гиперболических зависимостей, которые могут служить базой оценки навыка, следует привлекать наиболее квалифицированных сварщиков.

Библиографический список

1. Панков В.В. Оценка квалификации сварщика с применением цифровых технологий / В.В. Панков, В.М. Букин, С.В. Панков, И.Г. Богородский // Сварка и диагностика. 2012. № 6. С.54-58.
2. Патент РФ № 2550979, МКИ G 09/ 03 К 19/24 В23К 9/00 / Способ контроля качества поверхности сварочного шва /Букин В.М., Панков В.В., Богородский И.Г., Панков С.В. Заявитель и патентообладатель ООО «Техмашсервис» (RU); заявл. 03.04.2014; опубл. 20.11.2015; Бюл. № 32.
3. Панков В. Мера формы сварного шва / В.В. Панков, С.В. Панков, И.Г. Богородский В.М. Букин, // Сварка и диагностика. 2016. № 1. С.21-26.
4. Сас А.В. Системы для управления процессами дуговой сварки с обеспечением инвариантности свойств соединений к неконтролируемым возмущениям / А.В. Сас.// Автореф. дисс. докт. техн. наук. Волгоград. - 2008. 35 с.
5. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высш. шк., 1988.- 239 с.
6. Патент РФ № 2639748, МПК В 23 К 9/14 / Способ дуговой двухэлектродной сварки покрытыми электродами/ В.П. Сидоров // Заявитель и патентообладатель В.П. Сидоров (RU); Заявл. 22.09.2016; Бюл. № 36.
7. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. - М.: Наука, 1987 - 240 с.
8. Способ дуговой сварки штучным покрытым электродом / В.П. Сидоров, С.В. Абрамова, И.А. Новский // Решение от 22.11. 2017 о выдаче патента РФ по заявке № 2016110977 от 24.03.2016 г. Опубл. 28.09.2017. Бюл. № 28.
9. Лозовой В.Г. – К вопросу о сварке на прямой полярности / В.Г. Лозовой, В.М. Дзюба, О.В. Дзюба, С.А. Штоколов, С.А. Курланов С.А. // Сварка и Диагностика. 2014. № 6. С. 55-59.

Регулирование проплавления при сварке с учетом отклонения дуги от стыка

Сидоров В. П., д-р техн. наук, профессор
Мельзитдинова А. В.
ТГУ, г. Тольятти

Целью работы является повышение качества стыковых сварных соединений посредством учета отклонения дуги от стыка при автоматическом регулировании глубины проплавления. Такое отклонение не позволяет при использовании известных способов регулирования располагать точку замера температуры поверхности в зоне с максимальной глубиной проплавления. Предложено определять отклонение дуги от стыка путем измерения температуры в двух точках, расположенных на поверхности изделия симметрично стыку. С помощью формулы для расчета температур при сварке от нормально-кругового источника тепла, действующего на поверхности пластины, представлено эталонное распределение температуры вдоль линии, проходящей через точки замера температур. Предложено по полученной разности измеренных температур точек и эталонному распределению температур сначала определять отклонение сварочной дуги от стыка, а затем отклонение температур в точках замера от ее эталонного значения, вызванное отклонением дуги от стыка. Это позволяет контролировать изменения, вызванные влиянием других возмущающих факторов. Регулирование глубины проплавления производится по аналитической математической модели. Коэффициенты этой модели определяются на основе эксперимента по измерению размеров шва. Полученная информация вводится в вычислительное устройство и по предложенному математическому выражению производится расчет регулирующего параметра сварки, устанавливаемого с помощью регулирующего устройства. Приведены примеры расчета регулирующего воздействия при отклонении дуги от стыка.

Ключевые слова: дуговая сварка; отклонение дуги; автоматическое регулирование; математическая модель; распределение температур.

Введение. Регулирование параметров сварочной ванны по математической модели представляет значительный интерес для сварочного производства. Однако известные способы регулирования [1–4] не учитывают отклонение теплового пятна дуги от стыка, которое может быть вызвано действием магнитных полей, загрязнений поверхности металла и др. и привести к тому, что известные способы регулирования, связанные с измерением температуры шва или ширины зоны нагрева будут неэффективны. Известный способ контроля отклонения дуги от стыка с помощью ультразвуковых колебаний [5], вводимых в зону сварки, не нашел промышленного применения. В работе [6] предложено определять отклонение дуги путем измерения температуры в двух точках, расположенных симметрично относительно стыка.

Целью данной работы является создание предпосылок для повышения качества регулирования за счет учета одновременно как действия отклонения дуги от стыка, так других возмущений.

Методика исследований. Сущность методики заключается в том, что при измерении температур поверхности в двух точках, симметрично расположенных относительно стыка можно установить как отклонение дуги от стыка, так и воздействие остальных возмущений и устранить их влияние.

На рис. 1 показано расположение точек замера на поверхности изделия со стороны действия сварочной дуги.

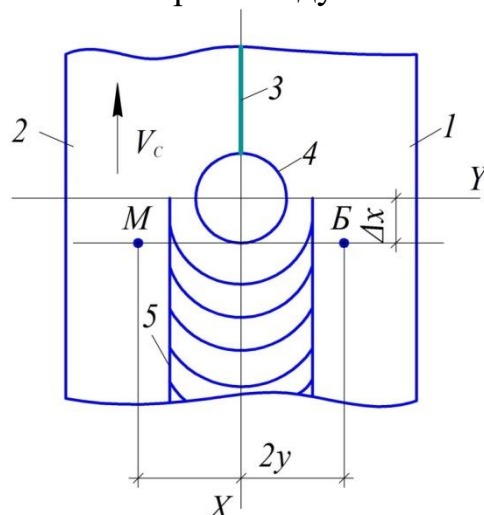


Рисунок 1. Схема расположения точек замера температур
1,2 – свариваемые пластины; 3 – стык; 4 – пятно нагрева дуги; 5 – шов;
М и Б – точки замера температур

Линия, на которой расположены точки замера Б и М, смещена по оси X от центра координат на величину Δx в сторону, противоположную направлению сварки и расположена в области с максимальной глубиной проплавления, выбирается по известному способу регулирования [7]. При смещении дуги в поперечном направлении по оси Y пятно нагрева 4 становится ближе к одной из точек замера температуры, а от второй точки удаляется. В связи с этим температура в одной точке увеличивается, а в другой уменьшается. Эти изменения происходят на различную величину, так как кривая эталонных температур нелинейна. По разности температур, имея эталонное распределение температур по линии, соединяющей точки замера температуры Б и М, можно определить отклонение оси теплового пятна 4 дуги от линии стыка 3. Одновременно при отклонении теплового пятна 4 дуги от линии стыка 3 уменьшается глубина проплавления. Под эталонным распределением температур понимается такое, при котором все параметры процесса сварки имеют номинальные значения, и отклонений от них нет, а глубина проплавления также имеет номинальное значение. Эталонное распределение температур может быть получено экспериментальным или экспериментально-расчетным путем.

Результаты исследований. На рис. 2 представлена одна ветвь эталонного распределения температуры вдоль линии, проходящей через точки замера температуры, полученная с помощью формулы для расчета температур при сварке от нормально-кругового источника тепла действующего на поверхности пластины [8]. Температуры точек измеряются за пределами сварочной ванны, поэтому распределение построено для температур меньших температуры плавления металла и не доходит до точки $y=0$.

Номинальные значения теплофизических коэффициентов принимались при расчете для высоколегированной стали 304L (США): объемная теплоемкость $c_p = 3,476 \text{ Дж}/(\text{см}^3\text{°C})$, коэффициент температуропроводности $a = 0,0432 \text{ см}^2/\text{с}$ [9]. Плотность осевого теплового потока, была выбрана по литературным данным $q_0 = 4200 \text{ Вт}/\text{см}^2$. Коэффициент сосредоточенности сварочного источника тепла составил $k = 11 \text{ см}^{-2}$, диаметр пятна нагрева $D_H = 1,04 \text{ см}$. Номинальная температура деталей перед сваркой принималась $T_0 = 20 \text{ °C}$. Параметры источника тепла для кривой на рис. 2: эффективная мощность $q_{\text{и}} = 1800 \text{ Вт}$, скорость сварки $V_C = 0,43 \text{ см}/\text{с}$, толщина пластины $\delta = 0,6 \text{ см}$. Данной эффективной мощности соответствует приблизительно сварочный ток $I \approx 250 \text{ А}$ при коэффициенте полезного действия дуги в аргоне $\eta_{\text{и}} = 0,6$ и напряжении сварки (дуги) $U = 12 \text{ В}$. Известны шесть характеристик нормально-кругового источника тепла ($q_{\text{и}}$, k , q_0 , D_H , t_0 , q_C), связанных между собой. Источник тепла может быть описан любыми тремя из них, если хотя бы один из них представляет мощность или тепловой поток. Здесь q_0 представляет осевой тепловой поток в пятне нагрева [10].

На оси Y рис.2 отмечено положение точки Б замера температуры относительно стыка (оси X) и изменения температуры, которые произойдут в этой точке при отклонении теплового пятна дуги на величину $\Delta y = 0,2 \text{ см}$.

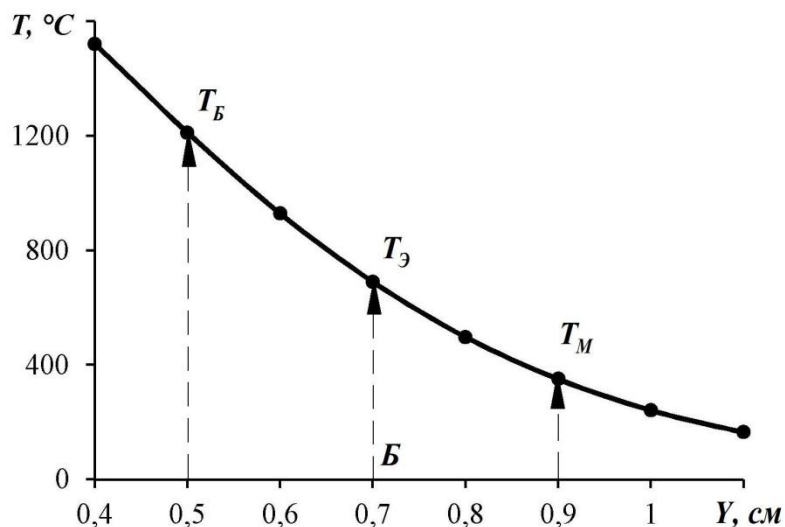


Рисунок 2. Эталонное распределение температур

При отсутствии смещения теплового пятна от стыка температура в точке Б эталонная $T_э$. При смещении теплового пятна в сторону точки Б эталонное распределение температур также сдвинется на эту величину в этом же направлении. Это можно учесть на эталонной кривой рис. 2 отысканием температуры при условном изменении положения точки Б на $-\Delta y$. Температура в точке Б в этом случае повысится до T_B . При удалении пятна нагрева дуги от точки Б на $+\Delta y$ температура в точке Б понизится до T_M . Соответственно температура в другой симметричной точке замера М

температура будет изменяться противоположно. Разность температур точек будет изменяться единственным образом для данной эталонной зависимости. Реальное смещение оси пятна нагрева и дуги относительно стыка и точек Б и М можно однозначно найти в процессе сварки по разности измеренных температур в двух точках замера, нанося эту разность на кривую эталонной температуры или построив зависимость разности температур точек от смещения дуги. Имеющаяся разность температур ($T_B - T_M$) может быть получена при единственном положении центра дуги относительно стыка. Это возможно потому, что действие других возмущений приводит к одинаковому (эквидистантному) изменению температуры пластин и точек замера и эталонная температурная зависимость смещается выше или ниже, а разность температур точек замера, вызванная смещением дуги от стыка при этом не изменяется. Это позволяет разделить температурное изменение в точках замера температуры за счет отклонения дуги от стыка и от действия остальных возмущений.

На рис. 3 кривая 1 показывает отклонение температуры ΔT_{CB} для точки замера Б, к которой дуга приближается, а кривая 2 – изменения температуры ΔT_{CM} для точки замера М, от которой дуга удаляется. В общем случае отклонения температур от эталонного значения для каждой точки различны $\Delta T_{CB} \neq \Delta T_{CM}$.

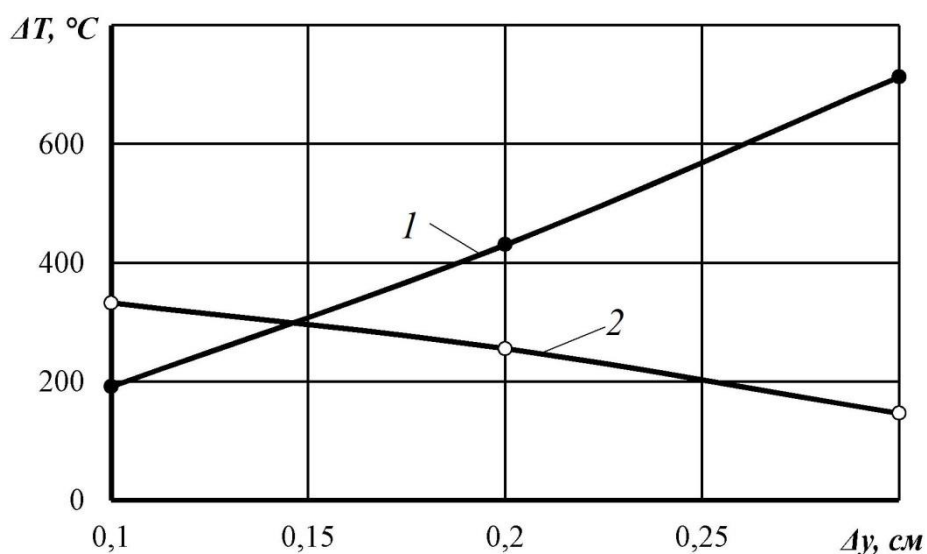


Рисунок 3. Зависимости отклонения температуры в точках замера при смещении дуги от стыка

Кривая на рис. 4 представляет положение реального распределения температур вдоль оси Y при действии всех возмущений, в том числе при смещении дуги от стыка. На кривой в точке Б замера измеренная температура T_B . Из этой температуры вычитаем установленное по разности температур точек отклонение за счет смещения дуги ΔT_{CB} . В результате получим температуру в точке при действии остальных возмущений T_T . В способе регулирования [7] именно эта температура, но как измеренная,

используется для расчета регулируемого параметра сварки. Точка Т на плоскости рис. 4 показывает положение расчетной температуры точки при действии отклонений остальных параметров процесса и неконтролируемых возмущений, исключая отклонение дуги от стыка.

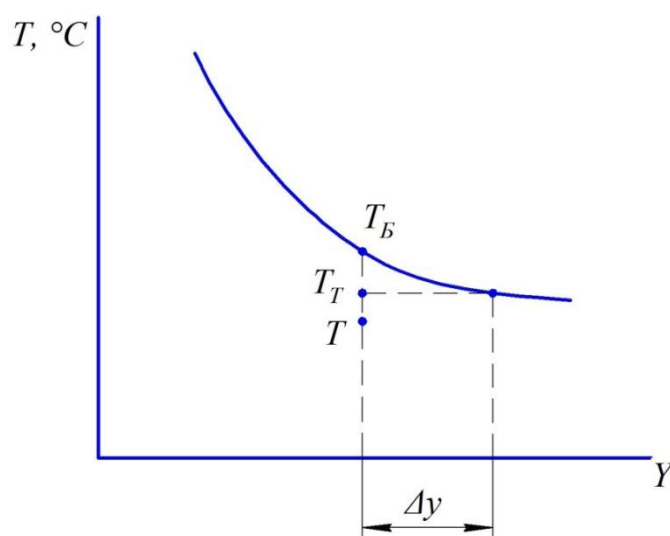


Рисунок 4. Схема определения температур в одной точке замера при действии возмущений, исключая отклонение дуги от стыка

Поэтому математическое выражение для определения регулируемого параметра сварки по предлагаемому способу будет иметь вид:

$$(P - P_0) = \left[T - \frac{(T_B - \Delta T_{CB}) + (T_M + \Delta T_{CM})}{2} \right] / M, \quad (1)$$

где М – константа, определяемая как отношение предельно допустимого изменения температуры на поверхности изделия в заданной точке измерения к предельному допустимому изменению регулируемого параметра сварки при допустимых отклонениях глубины проплавления, при отсутствии отклонения дуги от стыка [7];

Р – требуемое значение регулируемого параметра сварки;

Р₀ – эталонное значение регулируемого параметра сварки;

Т – расчетное значение температуры точки поверхности изделия при отсутствии отклонения дуги от стыка;

Т_Б – большая из измеренных текущих температур точек замера;

ΔТ_{СБ} – изменение температуры точки с большей температурой от действия отклонения дуги от стыка;

Т_М – меньшая из измеренных текущих температур точек замера;

ΔТ_{СМ} – изменение температуры точки с меньшей температурой от действия отклонения дуги от стыка.

Температуры Т_{ТБ}=(Т_Б-ΔТ_{СБ}) и Т_{ТМ}=(Т_М+ΔТ_{СМ}) теоретически должны быть равными, однако вследствие некоторой неточности измерений температур и других погрешностей они будут несколько отличаться друг от друга. Поэтому для повышения точности определения температуры

точек замера без действия отклонения дуги необходимо усреднить два полученных значения. Поэтому в формуле (1) они складываются и делятся на два.

При регулировании по математической модели вся информация о текущих значениях параметров сварки передается в вычислительное устройство. Кроме того, в него предварительно вводится эталонное распределение температур. По эталонному распределению с помощью определенного ранее смещения дуги от стыка при измененных на $\pm\Delta u$ координатах точек Б и М определяются отклонения температур ΔT_{CB} и ΔT_{CM} точек замера, вызванные отклонением дуги от стыка. Эти отклонения складываются и вычитаются с измеренными температурами. Затем производится усреднение этих последних значений. Также в вычислительном устройстве производится расчет температуры T в точках замера Б или М по методике [8]. Эта температура для точек замера одинакова, поэтому расчет может выполняться для одной из точек. После этого производится расчет необходимого значения регулирующего параметра сварки по математическому выражению (1) и установка полученного значения с помощью регулирующего устройства. При необходимости может использоваться система возвращения теплового пятна дуги симметрично относительно стыка. Однако в большинстве случаев необходимости в такой системе нет.

Для примера проводили определение регулирующего параметра сварки при одновременном отклонении дуги от стыка и начальной температуры свариваемых деталей.

Для сварки были использованы пластины из стали 20 толщиной 6 мм. Рассматривалось регулирование для случая первого слоя двухстороннего сварочного шва. Номинальная глубина провара составила 60% от толщины пластин $H_0=3,6$ мм. Допустимые отклонения от этой величины были выбраны $\pm 0,6$ мм, т. е. $\pm 10\%$ от номинального значения. Для получения номинальной глубины проплавления был подобран режим аргонодуговой сварки без присадочной проволоки: напряжение сварки (дуги) $U=14,0$ В, ток сварки (дуги) $I=275$ А, скорость сварки $V_c=0,25$ см/с. В качестве регулируемого параметра сварки был выбран сварочный ток. Ширина шва (сварочной ванны) составила $B_{ш}=1,0$ см. Для определения координаты точки замера использовали формулу расчета температур от нормально-кругового источника тепла на поверхности пластины. Величина эффективной мощности дуги была рассчитана при коэффициенте полезного действия дуги $\eta_{и}=0,6$, т.е. $q_{и}=275 \cdot 13,3 \cdot 0,6 = 2250$ Вт.

Теплофизические коэффициенты низкоуглеродистой стали 20 были выбраны по данным [11] $c_p=5$ Дж/(см³С), коэффициент теплопроводности $\lambda=0,4$ Вт/(см °С), температуропроводность $a=0,08$ см²/с. При данных теплофизических коэффициентах по опытному значению номинальной глубины проплавления $H_0=0,36$ см и температуре плавления низкоуглеродистой стали $T_L=1500$ °С было найдено соответствующее

значение коэффициента сосредоточенности теплового потока $k=5,86 \text{ см}^{-2}$. Расчетное значение ширины шва при выбранных теплофизических коэффициентах $B_{\text{ш}} = 1,04 \text{ см}$ и определенном коэффициенте сосредоточенности хорошо совпадает с опытным. Расхождение составляет 4%. Поэтому расчетным путем была найдена координата z точки с максимальной глубиной проплавления $y=0, x=0, z=6 \text{ см}$. В соответствии с требованиями известного способа [7] регулирования точка замера температуры должна находиться в пределах $x=0,48-0,72 \text{ см}$, была выбрана точка с координатой $x=0,7 \text{ см}$. Расстояние точки замера от оси X $y=1,2 \text{ см}$. Точка замера располагалась вправо от стыка по направлению сварки.

Опытным путем было установлено, что допустимое отклонение сварочного тока, приводящее к допустимому изменению глубины проплавления составляет для верхнего предела глубины проплавления $H_M=0,42 \text{ см}$ $\Delta I=18 \text{ А}$. Также было установлено, что номинальная (эталонная) температура в точке замера $T_H=418 \text{ }^\circ\text{C}$, а ее предельное значение при достижении провара максимального значения $H_M=0,42 \text{ см}$ при токе $I = 293 \text{ А}$ $T_H=447 \text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, коэффициент M для определения регулируемого параметра сварки составляет $M=29/18 = 1,61 \text{ }^\circ\text{C/A}$.

Определяли значение регулируемого параметра по способу [7] при нагреве свариваемых деталей на $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Поскольку параметры сварки не изменяются, расчетная температура в точке замера будет равна номинальной $T_H=418 \text{ }^\circ\text{C}$, а измеренная повысится на $30 \text{ }^\circ\text{C}$ и составит $T_T = 448 \text{ }^\circ\text{C}$.

По формуле (1) определяли значение регулируемого параметра сварки, которым в данном случае является сварочный ток $I=(T_H - T_T)/M + I_0 = (418 - 448)/1,61 + 275 = -19 + 275 = 256 \text{ А}$.

Следовательно, для компенсации нагрева деталей необходимо уменьшить ток сварки на 19 А . При сварке подогретых на $30 \text{ }^\circ\text{C}$ пластин на токе $I = 275 - 19 = 256 \text{ А}$ получили номинальное значение глубины проплавления $H_0=0,36 \text{ см}$.

Определяли также влияние только отклонения дуги на провар и температуру в точке замера. Задавали отклонение дуги от стыка на $\Delta y = 1 \text{ мм} = 0,1 \text{ см}$ от точки замера. Отклонение дуги обеспечивали за счет смещения электрода сварочной горелки с дугой относительно стыка влево от оси стыка по направлению сварки. Глубина проплавления уменьшается при смещении дуги одинаково, независимо от направления (знака) смещения. По данным опыта оно составило $\Delta H_C = -0,02 \text{ см}$. Глубина провара $H = 0,36 - 0,02 = 0,34 \text{ см}$. Это объясняется тем, что изменение провара вблизи оси X происходит незначительное. Таким образом, в пределах смещения дуги на $1-2 \text{ мм}$ отклонение провара мало и может не регулироваться, но велико его влияние на температуры точек замера. При этом температура в точке замера уменьшилась на $65 \text{ }^\circ\text{C}$ и составила

$T_M=353$ °С. При отсутствии других возмущений регулируемый параметр – ток определится по формуле (1)

$$I=(T_H-T_T)/M+I_0 = (418-353)/1,61 +275 = 40+275 = 315A.$$

Такое увеличение тока приводит к полному провару пластин на всю толщину $H= 6$ мм. Это связано с тем, что при определенном увеличении мощности сильно сказывается отражение тепла от обратной плоскости пластины, что приводит к скачкообразному росту провара.

Таким образом, при регулировании по известным методикам система неадекватно реагирует на возмущение по отклонению дуги от стыка, если отклонение дуги будет приводить к ее удалению от точки замера температуры.

При совместном действии отклонения дуги и повышении температуры детали на 30°С температура в точке замера понизилась на 35 °С по отношению к номинальной температуре и составила 383 °С. Расчетное значение тока сварки по способу [7] по формуле (1)

$$I=(T_H-T_T)/M+I_0 = (418-383)/1,61 +275 = 28+275 = 303 A.$$

Система регулирования по способу [7] вместо уменьшения тока на 19 А увеличит его на 28 А, что приведет не к уменьшению провара до номинального значения, а к его увеличению до $H= 0,46$ см, что больше установленного предела $H_M=0,42$ см. Отклонение дуги, как показано выше, дает вклад в отклонение глубины проплавления всего 0,02 см, что не может существенно повлиять на результат. В итоге система регулирования также не выполняет своего назначения.

Для определения значения регулируемого параметра сварки по предлагаемому способу определяли эталонное распределение температур вдоль линии, проходящей через точку с координатой $x=0,7$ см и перпендикулярную стыку. Полученное распределение приведено в табл. 1.

Таблица 1

Эталонное распределение температур

у, см	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
T, °С	971	822	699	586	495	418	353

По данным табл. 1 была получена зависимость разности температур в точках замера от отклонения дуги от стыка. Зависимость приведена в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость разности температур

Δy , см	0,05	0,1
ΔT , °С	80	142

В процессе сварки вторая точка замера температуры была расположена симметрично первой относительно стыка на расстоянии от него $y=1,2$ см. При одновременном отклонении дуги от стыка и подогреве деталей было получено, что температура во второй точке замера $T_B = 525$ °С, в первой $T_M = 381$ °С. Разность температур $\Delta T = 144$ °С. По этой

разности с помощью табл. 2 подтвердилось, что отклонение дуги от стыка 0,1 см. Отклонения температур в точках замера от действия отклонения дуги - к которой дуга приблизилась $\Delta T_{CB}=+77$ °С, а от которой удалилась $\Delta T_{CM}=-65$ °С. Поскольку параметры процесса сварки не изменились, то расчетная температура в точках замера одинакова и равна номинальной (эталонной) температуре $T=418$ °С. В реальности температура в точках замера оказалась $T_B=525$ °С и $T_M=381$ °С.

Значение регулируемого параметра определяется по формуле (1)
 $(I - I_0) = \{T - [(T_B - \Delta T_{CB}) + (T_M + \Delta T_{CM})]/2\} / M = \{418 - [(525 - 77) + (381 + 65)]/2\} / 1,61 = (418 - 448) / 1,61 \approx -18$ А.

Отсюда, $I = 275 - 18 = 257$ А.

Таким образом, при регулировании по предлагаемой методике отклонение дуги от стыка на $y=0,1$ см и повышение температуры деталей на 30 °С потребует уменьшения тока сварки только на 18 А. Установленное отклонение дуги может быть устранено отдельно путем возвращения дуги в нормальное положение, например, за счет воздействия внешнего магнитного поля. В случае отказа от регулирования отклонения дуги изменение провара составит 0,02 см, что не выходит за пределы установленного отклонения.

Выводы.

1. Предложен способ регулирования глубины проплавления с помощью измерения температуры на поверхности пластин в двух точках, расположенных симметрично относительно стыка.

2. Определение отклонения дуги от стыка производится по результатам разности эталонного распределения температур и измеренных температур точек.

3. Предложена формула, позволяющая рассчитывать регулирующий параметр, учитывающая отклонение дуги от стыка и действие других возмущений.

4. Выполненные расчеты для конкретных случаев возмущений показали применимость и результативность предложенной методики.

Библиографический список

А.с. 1013163 СССР, МКИ³ В 23 К 9/10. Способ автоматического регулирования глубины проплавления при автоматической дуговой сварке / А.В. Сас, А.В. Чернов, Э.А. Гладков, В.М. Ганюшин, В.Н. Бродягин (СССР). - № 3388861/25-27 ; заявл. 01.02.82 ; опубл. 23.04.83, Бюл. № 15. - 4 с. : ил.

1. Способ регулирования глубины проплавления при автоматической аргодуговой сварке неплавящимся электродом без присадочной проволоки / Б.Е. Патон, В.К. Лебедев, Н.В. Подола, П.М. Руденко / А.С. 1123803 (СССР) МКИ В23К9/10 – Опубл. 15.11.84. Бюл. № 42.

2. Способ автоматического регулирования глубины проплавления при сварке неплавящимся электродом / Э.А. Гладков, Н.А. Ширковский, О.Н. Киселев, Е.М. Кричевский, Ю.Н. Бобылев / АС № 1346369 (СССР) МКИ В 23К 9/10 – Опубл. 23.10.87. Бюл. № 39.

3. Гладков Э.А. Автоматизация сварочных процессов / Э.А. Гладков, В.Н. Бродягин, Р.А. Перковский.- М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2014. - 421 с.
4. Способ контроля отклонения дуги от стыка свариваемых кромок / Ю.Н. Сергеев, В.Н. Тэфанов, В.В. Пашенко и др. / А. с. № 1042924 (СССР), МКИ² В 23 К 09/10. - Оpubл. 23.09.83, Бюл. № 35.
5. Способ контроля отклонения дуги от стыка свариваемых кромок: пат. 2632751 Рос. Федерация: МПК В 23 К 9/095/ Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В.; № 2016135586; заявл. 01.09.16; опубл. 09.10.17, Бюл. № 28. – 1 с.
6. Способ автоматического регулирования глубины проплавления при автоматической дуговой сварке: пат. 2613255 Рос. Федерация: МПК В 23 К 9/095/ Сидоров В.П., Мельзитдинова А.В.; - № 2015142359; заявл. 05.10.15; опубл. 15.03.17, Бюл. № 8. – 2 с.
7. Расчет температуры нагрева тонколистового металла нормально-распределенным источником при точечной сварке импульсной дугой / П.В.Денисов, Г.А. Мирлин // Сварочное производство.- 1974.- №1.- С.3-6.
8. Сидоров, В.П. Двухдуговая двусторонняя сварка неплавящимися электродами в аргоне /В.П. Сидоров, С.А. Хурин. - Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. - 191 с.
9. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов и [др.]; под ред. В.М. Неровного.- М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.-752 с.
10. Кархин В.А. Тепловые процессы при сварке: монография. - СПб.: Изд-е политехн. ун-та, 2015. - 572 с.

Исследование процесса захлаживания криогенных сосудов

Скочиллов П. Н.

АО «Уралкриомаш», Россия, Нижний Тагил

Статья посвящена исследованию процесса захлаживания криогенных сосудов. Исследование проведено с помощью вычислительного эксперимента над компьютерной моделью криогенного сосуда. Разработанная методика расчета захлаживания криогенного сосуда реализована в виде программного модуля в системе MathCad. Организация расчета в виде программных модулей позволяет перейти от одного расчетного режима к другому, изменяя условия заполнения, рабочий продукт и сам криогенный сосуд, без необходимости внесения изменений в расчетный модуль.

В статье описан ряд допущений и упрощений, принятых из-за сложности математического описания криогенного сосуда, а также процессов, происходящих в нем при захлаживании.

Результаты моделирования показывают, что каждый этап нестационарного процесса охлаждения, характеризуемый расходом заполнения, может быть разделен на два сменяющих друг друга режима: переходный режим и регулярный режим. Также показано, что переходный режим сменяется регулярным примерно через 10 минут. При этом именно переходный режим характеризуется наибольшими нагрузками на сосуд, что видно по темпу изменения температур и по подъему давления.

Использование разработанного программного модуля позволяет оценить эффективность использования холода отходящих паров. Описаны возможности программного модуля, позволяющие сравнить различные способы организации захлаживания сосуда и выбрать из них наиболее оптимальный.

Результаты работы программы показывают, что время захлаживания криогенного сосуда существенно зависит от расхода заполнения сосуда. При этом время захлаживания, определенное программой близко к экспериментальным значениям.

Ключевые слова: захлаживание, криогенный, сосуд, расчет, моделирование, нестационарный.

Вашему вниманию представляется проект, целью которого стало исследование процесса захлаживания криогенных сосудов.

Задача возникла в связи с модернизацией вагона-цистерны для аргона, азота и кислорода. В частности требовалось оценить время захлаживания сосуда цистерны до и после установки системы душирования.

Разработанная мной методика расчета захлаживания криогенного сосуда реализована в виде программного модуля в системе MathCad. Организация расчета в виде программных модулей позволяет легко перейти от одного расчетного режима к другому, изменяя условия заполнения, рабочий продукт и сам криогенный сосуд, без необходимости внесения изменений в расчетный модуль.

Поскольку полное математическое описание криогенного сосуда, а также процессов, происходящих в нем при захлаживании, крайне сложно при постановке задачи был принят ряд допущений и упрощений.

1. Криогенный сосуд представляет собой горизонтальный тонкостенный цилиндр. При этом используются фактические значения параметров сосуда, такие как масса, геометрический объем и диаметр.

2. Сосуд разбивается на горизонтальные слои равной высоты. При этом каждый слой имеет свою вместимость, массу стенки и температуру стенки.

3. Давление в сосуде при захлаживании поддерживается постоянным.

4. Температура жидкости в сосуде равна температуре кипения.

5. Температура газа в сосуде однородна по высоте.

6. Начальная температура металла сосуда и газа в сосуде равна комнатной температуре.

7. Жидкость в сосуд подается постоянным расходом.

Моделируемые программой процессы, протекающие при захлаживании сосуда можно описать следующим образом:

1. В сосуд подается криогенная жидкость. Уровень жидкости в сосуде увеличивается.

2. Происходит теплообмен между криогенной жидкостью и стенкой сосуда на тех слоях, которые контактируют с жидкостью. Соответствующие слои стенки охлаждаются, а криогенная жидкость кипит. В программе реализованы два режима кипения — пленочное и пузырьковое, а также второй кризис кипения — переход от пленочного к пузырьковому режиму кипения.

3. Происходит взаимодействие кипящей криогенной жидкости и газовой подушки. Испарившаяся часть жидкости поступает в газовую подушку. Масса газовой подушки увеличивается, а температура понижается.

4. Происходит теплообмен между газовой подушкой и стенкой сосуда на тех слоях, которые контактируют с газом. Соответствующие слои стенки охлаждаются, а температура газовой подушки повышается.

5. Происходит утилизация паров из газовой подушки, что позволяет поддерживать давление в подушке. Масса газа в сосуде при этом уменьшается.

6. Происходит теплообмен между различными слоями стенки сосуда.

Рассмотрим результаты работы программы для следующих условий: в течение первого часа сосуд заполняется жидким азотом малым расходом 0.7 кг/с; через час расход заполнения увеличивается до 10 кг/с; при заполнении 95 % объема заполнения сосуда прекращается.

Таким образом, весь процесс захлаживания разделяется на три участка, характеризующихся расходом заполнения.

На каждом из этих участков нестационарный процесс охлаждения может быть разделен на два сменяющих друг друга режима: переходный режим и регулярный режим.

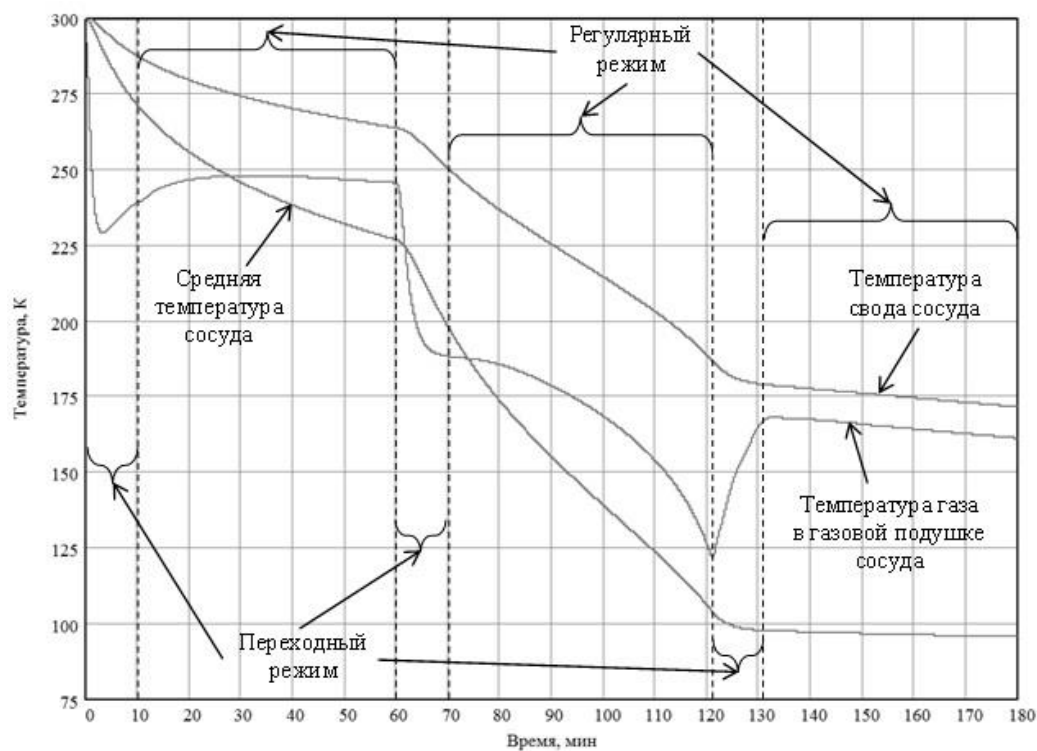


Рисунок 1. Графики изменения характерных температур

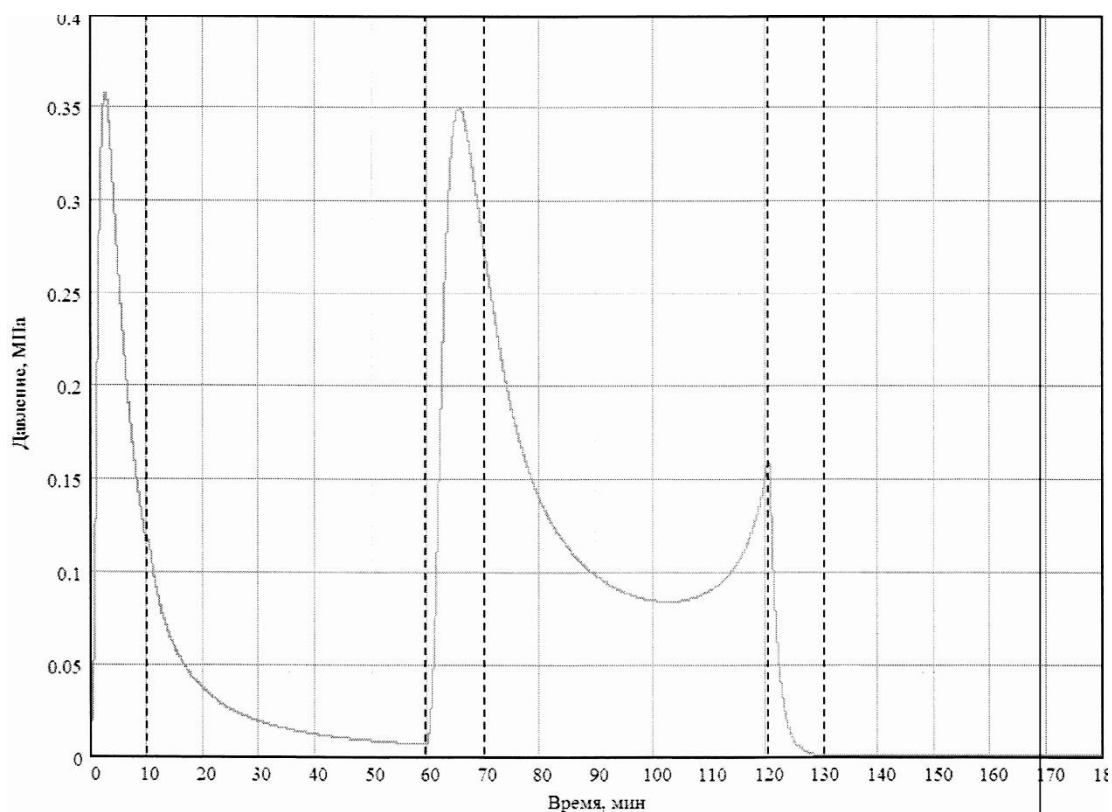


Рисунок 2. График перепада давления в трубопроводе газосброса

Из представленных графиков видно, что для описанных условий переходный режим сменяется регулярным примерно через 10 минут.

При этом именно переходный режим характеризуется наибольшими нагрузками на сосуд, что видно по темпу изменения температур и по подъему давления.

Программа позволяет оценить эффективность использования холода отходящих паров. Так в нашем случае, доля отходящих паров в отведении тепла от сосуда достигает 45 %. При этом данное значение может быть изменено двумя путями.

Первый – изменение темпа заполнения. Важно отметить, что результат подобного изменения заранее не очевиден, и может привести как к изменению эффективности использования холода отходящих паров как в одну, так и в другую сторону. Программа позволяет определить, в какую сторону произойдут изменения и насколько они окажутся велики.

Второй способ – это внесение конструктивных изменений в систему захлаживания, таких как установка экранов, охлаждаемых отходящими парами, или установка системы душирования. Насколько эти меры окажутся эффективны, также заранее не очевидно, однако программа позволяет оценить максимально возможный тепловой поток, отводимый парами.

Для описанных условий тепло, отводимое парами теоретически возможно увеличить в 1,5 – 2 раза, что приведет к сокращению времени захлаживания и уменьшению потерь жидкого продукта в ходе захлаживания.

Результаты работы программы показывают, что время захлаживания криогенного сосуда существенно зависит от расхода заполнения сосуда. При этом время захлаживания, определенное программой близко к экспериментальным значениям.

Программа позволяет сравнить различные способы организации захлаживания сосуда и выбрать из них наиболее оптимальный. Использование такого способа позволит, с одной стороны, сократить невосполнимые потери жидкого продукта при захлаживании. С другой стороны, это позволит не тратить на захлаживание слишком много времени. И наконец, это позволит избежать повреждений емкостей, связанных с захлаживанием, а значит увеличить срок службы емкостей.

Дополнительных рисков от использования данной программы не предполагается. Все это делает разработанную программу важным и полезным инструментом при проектировании криогенных емкостей.

Энергетическая инфраструктура обеспечения сжиженным природным газом удаленных от развитых сетей газотрубопроводов потребителей

Христенко Ю. А., канд. техн. наук

Белов В. В.

Бусыгин О. В.

АО «НИИМаш», г. Нижняя Салда

Черемных О. Я., канд. техн. наук

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

В настоящей работе показан научно-технический потенциал уральского региона в обеспечение реализации Государственной программы РФ «Развитие транспортной системы» [1] в части освоения сжиженного природного газа (СПГ) в качестве моторного топлива.

Показана перспектива выпуска инновационной наукоемкой продукции - газотурбовоза типа ГТ1h-001 (ГТ1h-002) до 2020 года в рамках программы РФ «Развитие транспортной системы» предприятиями уральского региона АО «Синара - Транспортные машины», г. Екатеринбург; АО «Уралкриомаш», г. Нижний Тагил; ООО «Электротяжмаш – Привод», г. Лысьва.

Приведена концепция инновационной энергетической инфраструктуры обеспечения сжиженным природным газом потребителей в удаленных регионах страны не имеющих развитой сети газотрубопроводов, но располагающих железнодорожным сообщением.

Использование железной дороги как основы проекта доставки СПГ удаленным потребителям от развитых сетей газотрубопроводов интенсифицирует процесс освоения СПГ в странах-импортерах.

Ключевые слова: сжиженный природный газ (СПГ), криогенная инфраструктура, железная дорога, газотурбовоз, транспортировка СПГ.

Крупномасштабное производство СПГ в РФ

По данным Министерства энергетики РФ по состоянию на 01.01.2017 г. добычу природного и попутного нефтяного газа на территории РФ осуществляли 268 добывающих предприятий:

- 85 входящих в состав вертикально-интегрированных нефтяных холдингов (ВИНХ);
- 16 дочерних компаний ПАО «Газпром»;
- 5 структурных подразделений ПАО «НОВАТЭК»;
- 159 независимых нефтегазодобывающих компаний;
- 3 предприятия, работающие на условиях соглашений о разделе продукции (операторы СРП).

Добыча природного газа в 2016г. составила 640,20 млрд. куб. м, в том числе экспорт- 208,60 млрд. куб. м. Компанией SakhalinEnergyInvestmentCompanyLtd. («Сахалин энергия»/Sakhalin Energy) произведено и экспортировано в страны азиатско-тихоокеанского региона 10,93 млн. тонн СПГ, т. е. ожижено было около 15,30 млрд. куб. м природного газа (газообразного метана), из которых 67,4% экспортировано в Японию [2].

«Сахалин энергия»/Sakhalin Energy была до конца 2017 года единственной компанией в РФ, осуществлявшей крупно-масштабное производство и экспорт СПГ. Производительность двух технологических линий завода СПГ по Проекту «Сахалин-2» составляет 9,6 млн. тонн СПГ в год.

Акционерами Сахалин энергия/SakhalinEnergy являются [3]:

- Gazprom Sakhalin Holdings (дочернее предприятие ПАО «Газпром», 50 % плюс одна акция);
- Shell Sakhalin Holdings (дочернее предприятие Royal Dutch Shell plc., 27,5% минус одна акция);
- Mitsui Sakhalin Holdings (дочернее предприятие компании Mitsui & Co.Ltd., 12,5% акций);
- Diamond Gas Sakhalin (дочернее предприятие компании Mitsubishi Corporation, 10 % акций).

В рамках Проекта «Ямал СПГ» 5 декабря 2017 года была введен в эксплуатацию первый блок/линия завода по производству СПГ мощностью 5,5 млн. тонн в год. Завод СПГ строится поблочно на базе Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождении полуострова Ямал. Проект «Ямал СПГ» предусматривает строительство и ввод в эксплуатацию еще двух технологических блоков/линий мощностью по 5,5 млн. тонн СПГ в год. По плану завод СПГ уже в 2019 году выйдет на уровень суммарной мощности 16,5 млн. тонн СПГ в год.

Акционерами Проекта «Ямал СПГ» являются:

- ПАО «Новатэк» (50,1 %);
- французская Total (20 %);
- китайские CNPC (20 %);
- Фонд Шелкового пути (9,9 %) [4].

Проект «Ямал СПГ» предполагает как спотовую, так и контрактную формы реализации произведенного СПГ. Существуют риски в реализации сбыта СПГ. Так, например, «Газпром» заключил в 2014 году контракт на поставку до 2,5 млн. тонн СПГ в год для индийской компании Gail на срок до 20 лет. «Газпром» согласно контракту должен начать поставки СПГ в 2018 году. Но в 2016 году компания Gail уведомила «Газпром», что хочет пересмотреть условия контракта и выдвинула требования по снижению объемов поставки в первые годы, уменьшению общего объема и цены, что для «Газпрома» означало прямые убытки. В действительности реальный объем потребления газа в Индии оказался меньше прогнозируемых расчетов компании Gail. Следует отметить, что индийской компании Gail уже приходилось перепродавать СПГ, полученный по долгосрочным контрактам от других Продавцов. Можно предположить, что снижение объемов импортируемого СПГ компанией Gail в Республику Индия во многом обусловлена задержками строительства инфраструктуры газораспределительных сетей по стране. Следует отметить, что СПГ - контракты традиционно включают в себя статьи с жестким условием «take-or-pay»/«плати или бери» (не менее 85%), поэтому сложилась такая ситуация, что компании Gail не выполняет условия договора [5].

Подобные намечающиеся срывы экспорта СПГ отчасти можно объяснить ростом конкуренции на рынке из-за увеличения объемов производства СПГ и избытка Поставщиков СПГ. Очевидно, что будет меняться подход в организации продаж СПГ. До момента поставки СПГ у Потребителя должна быть создана специальная инфраструктура. Эта инфраструктура должна включать в себя помимо портовых терминалов накопления СПГ криогенное оборудование различного назначения с автоматизированными системы управления технологическими процессами. В разработке и реализации интегрированных энергетических проектов должен быть комплексный подход к решению задач под ключ с привлечением научно-технического потенциала криогенной отрасли (криогенного машиностроения) стран экспортеров/импортеров. Следует также отметить, что под крупные энергетические проекты по СПГ требуется разработка необходимых нормативных правовых актов, учитывающих все преимущества применения СПГ не только как газа/топлива для населения, но и, например, как моторного топлива. Как правило страны-импортеры проводят лишь регазификацию в портах-терминалах СПГ, что задерживает освоение СПГ на внутреннем рынке.

СПГ на железнодорожном транспорте

Цикл обращения СПГ от производителя до потребителя включает в себя:

- производство СПГ из природного газа;
- создание терминальных запасов СПГ (на заводе производства СПГ);
- хранение СПГ;
- транспортирование СПГ;

- слив СПГ в расходные терминалы;
- регазификацию СПГ;
- выдачу потребителю газа.

Таким образом, мы имеем дело с обращением СПГ от производителя до потребителя с применением криогенной техники, которую в полном объеме будет выпускать отечественное криогенное машиностроение (*made in Russia*), включая создание заводов по производству СПГ. Такие вопросы без сомнения рассматриваются, и ряд из них одобрен в нормативных и ненормативных правовых актах Думы и Правительства РФ. Так, например, государственной программой РФ «Развитие транспортной системы» [1] предусматривается освоение применения применения сжиженного природного газа (СПГ) в качестве моторного топлива, что обеспечит рост заказов для криогенной отрасли.

Для решения региональных задач по вопросам энергетики целесообразно строить заводы СПГ по единому типовому проекту с мощностью меньшей, чем в Проектах «Сахалин 2» и «Ямал СПГ», например, создание проектов заводов с параметрическим рядом по мощности СПГ от 0,25 до 1,5 млн. тонн СПГ в год. При этом СПГ можно будет производить, как на месторождениях природного газа, так и на участках прокладки газовых трубопроводов. Заводы СПГ, использующие в качестве сырья газ из сетевых газотрубопроводов, предпочтительно строить в районах расположения тепло- или гидроэлектростанций, и, кроме того, районах приближенных к железной дороге.

Доставка потребителям произведенного СПГ и различных грузов по неэлектрифицированным железным дорогам на Севере, в Сибири и дальнем Востоке будет осуществляться с задействованием магистральных газотурбовозов типа ГТ1h-001 (ГТ1h-002) и маневровых газотепловозов типа ТЭМ19, использующих в качестве моторного топлива СПГ.

В настоящее время из производимого дизельного топлива в стране около 9 % используется на железной дороге (РЖД) в качестве моторного топлива. С целью экономии средств, выделяемых на дизельное топливо, компанией АО «РЖД» поставлена задача к 2030 году по замещению на 30 % потребления дизельного топлива сжиженным природным газом.

Газотурбовозы ГТ1h-001 (ГТ1h-002) являются первыми в мире серийными образцами газотурбовоза, работающие на моторном топливе СПГ. Мощность каждого из этих газотурбовозов составляет 8500 кВт с электрической передачей от главного генератора к электрическим тяговым двигателям, установленным на каждой из 12 колесных пар газотурбовоза с мощностью на валах 6720,0 кВт.

Газотурбовоз предназначен для эксплуатации на неэлектрифицированных участках железных дорог для вождения грузовых поездов повышенной длины и массы [6], [7].

Технические характеристики ГТ1h-001 (ГТ1h-002), см. табл. 1.

Таблица 1

Наименование параметра	Значение
Мощность по ГТД, кВт	8300
Служебная масса, т	360
Нагрузка на ось, кН (тс)	215 (22,5)
Сила тяги при трогании, кН (тс)	981,0 (100,0)
Сила тяги длительного режима, кН (тс)	775 (79,0)
Скорость длительного режима, км/ч	33
Касательная мощность длительного режима, кВт	7170
Запас топлива (СПГ) в цистернах, т	20
Часовой расход газа на режиме полной мощности, кг	2300
Запас хода, км, не менее	1000
Мощность на валах тяговых двигателей, кВт	6720,0
Тип авиационного газотурбинного двигателя	НК-361
КПД газовой турбины, %	30%

Заказчиком Проекта ГТ1h-001 (ГТ1h-002) является ОАО «Российские железные дороги».

Генеральные разработчики:

- Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна – Разработка Технического и Рабочего проектов.
- АО «Синара – Транспортные машины», г. Екатеринбург (АО «СТМ») – Интеграторы инновационного проекта (в том числе изготовление экипажной части, организация проведения сборки и испытания газотурбовоза).

Разработчики, изготовители и поставщики основного комплектующего инновационного оборудования:

- АО «Уралкриомаш», г. Нижний Тагил;
Общество с ограниченной ответственностью "Криомаш - балашихинский завод криогенного машиностроения" (ООО «КРИОМАШ БКМЗ»), г. Балашиха;
Fives Cryotec (Швейцария) – оборудование криогенного блока;
- ПАО «Кузнецов», г. Самара – силовой блок;
- Общество с ограниченной ответственностью «Лысьвенский завод тяжелого электрического машиностроения «ПРИВОД» (ООО «Электротяжмаш – Привод»), г. Лысьва, Пермский край – главный генератор;
- Акционерное общество «Людиновский тепловозостроительный завод» (АО «ЛТЗ»), г. Людиново, Калужская обл. – экипажная часть на базе ТЭМ7А;
- ООО «НПП РОСТ»; Акционерное общество «Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н.А. Семихатова» (АО «НПО Автоматики»), г. Екатеринбург – кабина;

- ГП «Завод «Электротяжмаш», г. Харьков (Украина) – тяговые электродвигатели. Преимущества газотурбовоза ГТ1h-001 (ГТ1h-002): Возможность развивать большую мощность при относительно небольших размерах и массе локомотива; Возможность работы на более дешевом топливе и существенно меньший расход смазочного масла; Зарегистрированные показатели вредных выбросов в окружающую среду, т.е. количество выхлопов окислов азота, оксидов и диоксидов углерода, оказались в 5 раз ниже жестких стандартов экологических норм Евросоюза и естественно значительно ниже по сравнению с магистральными тепловозами на дизельном топливе. Для маневрирования и небольших перегонов на газотурбовозе используют блок аккумуляторных батарей, и это значительно экономит топливо, когда не нужна максимальная мощность.

У маневрового локомотива ТЭМ19 двигатель работает на регазифицированном СПГ по термодинамическому циклу, подобно бензиновому двигателю, с воспламенением от искры. Расход энергоресурсов уменьшен по сравнению с дизельным локомотивом на 24 % [8].

На данный момент построено всего лишь два газотурбовоза, т. е. варианты ГТ1h-001 и ГТ1h-002, которые успешно эксплуатируются на Свердловской железной дороге. Согласно Программе [1] численность парка магистральных газотурбовозов типа ГТ1h-001 (ГТ1h-002) и маневровых газотепловозов типа ТЭМ19, использующих в качестве моторного топлива СПГ, к 2020 году составит не менее 91 шт., в том числе будет изготовлено 40 шт. газотурбовозов ГТ1h-001 (ГТ1h-002). Согласно Программе [1] особое внимание будет уделено базовым транспортным артериям Дальнего Востока - Транссибирской и Байкало-Амурской железнодорожным магистралям (БАМ), поэтому здесь будет испытана и освоена значительная часть этих газотурбовозов и маневровых газотепловозов.

В условиях рынка реализация того или иного бизнес-проекта зависит от притока инвестиций, займа кредитов, а также бюджетных средств. За эти ресурсы предприятия ведут постоянную борьбу. А прибыль с малыми рисками может дать лишь тот бизнес-проект, который опережает конкурентов в отрасли, прежде всего во внедрении инновационных разработок в продукцию [9]. Создание газотурбовоза ГТ1h-001 (ГТ1h-002) можно в полной мере отнести к инновационному проекту.

В условиях равнинной местности газотурбовоз ГТ1h-001 (ГТ1h-002) способен вести составы длиной до 3-х километров, т.е. 170 вагонов с общей массой более 16000 тонн. В условиях горной местности в регионах прохождения трассы БАМ такие газотурбовозы как ГТ1h-001 (ГТ1h-002) смогут надежно и безопасно вести составы с требуемым запасом мощности.

На территориях прохождения трассы БАМ будут построены наряду с Южно-Якутским угольным комплексом, включающего Нерюнгринский угольный разрез, еще целый ряд промышленных комплексов-гигантов по

освоению природных богатств, которым, безусловно, потребуется СПГ, как моторное топливо, как источник топлива для теплоэлектростанций и, наконец, как регазифицированный газ для бытовых нужд.

Криогенная инфраструктура для интенсификации освоения СПГ

Перевод природного газа из газообразного состояния в жидкое, т.е. получение СПГ с температурой 111,5 К, а также использование криогенных средств транспортировки позволяет решить проблему доставки его потребителям из районов газо-конденсатных месторождений или от развитых сетей газотрубопроводов, где будут построены заводы производства СПГ, в удаленные районы РФ. Разработчиком и изготовителем такого сертифицированного оборудования (контейнеров, железнодорожных цистерн, регазификаторов, трубопроводов и арматуры) под задачи создания криогенных инфраструктур СПГ вдоль трассы БАМ могут выступить криогенные предприятия РФ. Концептуальная схема Проекта энергетической инфраструктуры на основе железной дороги для обеспечения различных потребителей сжиженным природным газом удаленных потребителей приведена на рисунке. Логистика доставки СПГ потребителю включает в себя: отгрузку СПГ из заводских или портовых терминалов в криогенные железнодорожные цистерны (или контейнеры); транспортировку СПГ в цистернах (контейнерах) к фронту слива-налива СПГ стационарных емкостей потребителя; слив через фронт слива-налива СПГ из цистерн (контейнеров) в стационарные емкости потребителя; выдачу на регазификацию СПГ с автоматическим учетом расхода и одновременным формированием заказа на восполнение расходуемого запаса СПГ; выдачу через фронт слива-налива СПГ в автомобильные цистерны для последующей доставки по малым заказам удаленных потребителей. Под концепцию проекта, приведенного на рисунке, предприятия криогенной отрасли страны могут поставлять под ключ различные комплекты криогенного оборудования. Например, АО «Уралкриомаш» может выпускать и поставлять следующую номенклатуру оборудования для криогенной инфраструктуры [10]:

1. Контейнер-цистерна для СПГ.

Контейнер-цистерна предназначена для приема, хранения, выдачи СПГ и служит, как тара для транспортировки автомобильным, железнодорожным и морским транспортом, обеспечивая при этом полную сохранность и кондицию продукта, см. табл. 2.

Контейнер-цистерна состоит из криогенной емкости, закрепленной на торцевых рамах, криогенной запорной, предохранительной арматуры и КИП, размещенных в арматурном отсеке, и безопасного дренажного устройства.

Фланцы устройства слива-налива расположены в арматурном отсеке, который расположен в нижней части цилиндрической поверхности цистерны, что в свою очередь облегчает процесс слива-налива СПГ.

Таблица 2

Технические характеристики	Значение показателя
Типоразмер по ИСО	1AA
Тип по ООН	UN T75
Тип и размер контейнера	42k7
Общая вместимость, м ³	40
Максимальная масса брутто, кг (не более)	30480
Масса транспортируемого продукта, кг	14280
Рабочее давление в цистерне, МПа	0,7
Габаритные размеры, мм	12192x2438x2591
Температурный диапазон эксплуатации, град	от минус 40 до плюс 70
Контрольное время удержания, суток (не менее)	54
Подъем, крепления контейнера-цистерны	с помощью фитингов
Допустимая масса при штабелировании, кг	192 000
Назначенный срок службы, лет	20

2. Вагон-цистерна для сжиженного природного газа (СПГ)

Вагон-цистерна предназначена для транспортировки и хранения СПГ и транспортируется в железнодорожных составах общего назначения, см. табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики	Значение показателя
Габарит	02-ВМ
Вместимость, м ³	65,4
Масса порожней цистерны, т	41,9
Масса заливаемого продукта, т	23,56
Максимально допустимое рабочее давление в сосуде, МПа (кгс/см ²)	0,5 (5,1)
Испытательное давление в сосуде без учета вакуума в теплоизоляционной полости, МПа (кгс/см ²)	1,1 (11,22)
Испытательное давление в сосуде при наличии вакуума в теплоизоляционной полости, МПа (кгс/см ²)	1,0 (10,2)
Давление в изолирующем пространстве в период эксплуатации (в теплом состоянии), Па (мм рт. ст.)	1,33 (1×10 ⁻²)
Суточные потери от испарения при стационарном хранении приведенные к температуре: T=306K (33оС) и P=0,1 МПа (760мм рт. ст.), % в сутки:	0,417
Время бездренажного хранения при подъеме давления от 0,05 МПа до 0,5 МПа, суток	42
Допустимая температура стенки сосуда, °С	от минус 196 до плюс 70
Тип изоляции	Волокнисто-вакуумная
Масса тары, т	40,45 ± 1,21
Расчетная статическая нагрузка от колесной пары на рельсы, максимальная, кН (тс)	230,3 (23,5)

Длина, мм:	
по осям сцепления автосцепок	15090 ⁺⁶⁷ ₋₄₅
по концевым балкам рамы	13870 ± 10
емкости	14144 ± 40
База, мм:	10000±5
емкости	1850 ⁺⁷ ₋₅
тележки	
Конструкционная скорость, км/час	120
Модель двухосной тележки	18-100, тип 2
Срок службы, лет	20

Примечание: Конструкция вагона-цистерны для сжиженного природного газа (СПГ) будет соответствовать стандарту стран-импортеров для их транспортировки по ж/д в составе локомотивных сцепок с учетом размера колеи ж/д.

3. Холодные газификаторы сжиженного природного газа (ХГ/СПГ)

Емкости производятся в соответствии с техническими условиями, российскими стандартами и нормами для сосудов, работающих под давлением.

ХГ/СПГ, см. табл. 4, включает в себя вертикальные или горизонтальные криогенные емкости объемом до 250 м³ с испарителями; вакуумные криогенные трубопроводы, необходимые для создания систем снабжения и газификации, отвечающие требованиям конкретного Покупателя. Оборудование сертифицировано и имеет Разрешение на применение РО-СТЕХНАДЗОРА.

Таблица 4

Технические характеристики одной из систем ХГ/СПГ	Значение показателя
Продукт	азот, аргон, СПГ, кислород
Геометрический объем сосуда, м ³	до 120
Максимальное рабочее давление, МПа	до 1,6
Производительность по газу, м ³ /ч	до 2000
Нагрев газа по отношению к температуре окружающего воздуха, град	20
Тип	трубчатый (оробренная труба)

4. Емкости для хранения криогенных продуктов

Емкости, см. табл. 5, производятся в соответствии с техническими условиями, российскими стандартами и нормами для сосудов, работающих под давлением. Тип емкостей - вертикальные и горизонтальные криогенные емкости объемом до 250 м³, а также поставляет испарители, вакуумные криогенные трубопроводы, необходимые для создания систем снабжения и газификации, отвечающие требованиям конкретного заказчика. Оборудование сертифицировано и имеет Разрешение на применение РО-СТЕХНАДЗОРА.

Таблица 5

Технические характеристики	Значение показателя
Продукт	СПГ
Геометрический объем сосуда, м ³	От 100 до 250
Максимальное рабочее давление, МПа	до 1,6
Тепловая изоляция	волоконисто-вакуумная, экранно-вакуумная, порошково-вакуумная
Материал сосуда	нержавеющая сталь 12Х18Н10Т
Материал оболочки	низколегированная сталь 09Г2С
Арматура	Комплект для эксплуатации + для пусконаладки при введении в эксплуатацию+ ЗИП на два года эксплуатации
Уровнемер	Хранилища могут быть оснащены по требованию Покупателя различными типами уровнемеров с погрешностью измерения уровня в емкости хранения ± 1 мм

5. Криогенные трубопроводы для СПГ

Проектируемые и изготавливаемые криогенные трубопроводы для транспортировки сжиженного природного газа (СПГ), см. табл. 6. Криогенный трубопровод представляет собой двустенный трубопровод с экранно-вакуумной изоляцией и комплектуется следующими элементами: компенсаторами, металлорукавами, соединительными элементами, опорами, мембранными защитными устройствами, секциями криогенных трубопроводов.

Трубопроводы сертифицированы и имеют разрешение на применение Ростехнадзора.

Таблица 6

Технические характеристики	Значение показателя
Продукт	СПГ
Изоляция	экранны-вакуумная
Рабочее давление, МПа	от 0,1 до 2,5
Внутренний диаметр трубопровода, мм	от 20 до 200
Наружный диаметр трубопровода, мм	от 120 до 273
Температура окружающей среды, °С (градус Цельсия)	от минус 60 до плюс 70

6. Фронт заправки/слива СПГ

Для заправки СПГ из морских терминалов приема и хранения СПГ в железнодорожные вагоны-цистерны СПГ или транспортные контейнеры СПГ, а также слива доставленного СПГ в емкости хранения потребителя проектируются, изготавливаются и поставляются пожаро- и взрывобезопасные фронты заправки/слива СПГ под ключ с учетом конкретного заказа Покупателя.

Заключение

1. Эксплуатация на Байкало-Амурской железнодорожной магистрали (БАМ) газотурбовозов типа ГТ1h-001 (ГТ1h-002), а также маневровых газотепловозов типа ТЭМ19 на моторном топливе сжиженный природный газ (СПГ) будет способствовать интенсивному развитию экономических регионов Восточной Сибири и Дальнего Востока.

2. Масштабное применение СПГ обеспечит освоение ресурсов недр вдоль трассы БАМ, что в свою очередь будет способствовать созданию сотни тысяч рабочих мест, полной загрузке БАМ, развитию городов и поселков БАМ.

3. Использование железной дороги как основы проекта доставки СПГ удаленным потребителям от развитых сетей газотрубопроводов интенсифицирует процесс освоения СПГ как топлива в странах-импортерах.

4. Предприятия уральского региона АО «Синара- Транспортные машины»; АО «Уралкриомаш», г. Нижний Тагил; ООО «Электротяжмаш – Привод», г. Лысьва внесли весомый вклад в реализацию проекта по созданию инновационной наукоемкой продукции газотурбовоза типа ГТ1h-001 (ГТ1h-002).

Библиографический список

1. Государственная программа РФ «Развитие транспортной системы» с изменениями (Постановления правительства РФ от 31 марта 2017 г. № 398).
2. <https://minenergo.gov.ru/node/1156>.
3. <http://www.gazprom.ru/about/production/projects/Ing/sakhalin2/>.
4. <https://ria.ru/economy/20180119/1512959718.html>.
5. <https://newizv.ru/news/economy/28-11-2017/u-gazproma-problemy-indiyskiy-rynok-gaza-ne-opravdal-nadezhd>.
6. <http://tehnorussia.su/zheleznodorozhnaya-tehnika/39-gazoturbovozy/5-gazoturbovoz-gt1>.
7. www.sinara-group.com.
8. <http://tehnorussia.su/zheleznodorozhnaya-tehnika/39-gazoturbovozy/51-gazoturbovoz-tem19>.
9. Дроговоз П.А. Управление стоимостью инновационного промышленного предприятия. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 240с.
10. www.cryont.ru.

Анализ особенностей транспортирования на экспорт сжиженного природного газа и совершенствование конструкции контейнера-цистерны

Черемных О. Я., канд. техн. наук
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Страны Европы испытывают большую потребность в сжиженном природном газе (СПГ). Его можно экспортировать из России, используя с этой целью контейнеры-цистерны для СПГ. Анализируется опытная доставка первой партии СПГ с помощью контейнера-цистерны. Сообщается об использованной технологии слива СПГ в хранилище у потребителя. Данная технология исключает потери природного газа в процессе

слива и не нарушает экологические нормы. Опыт первой доставки СПГ может широко применяться при его мультимодальных перевозках в контейнерах-цистернах.

Ключевые слова: Контейнер-цистерна. Сжиженный природный газ (СПГ). Хранилище. Испаритель. Предохранительные устройства. Компримирование. Экология.

Один из основных вопросов в решении проблемы экспорта сжиженного природного газа (СПГ) из России в европейские страны – создание средств его доставки автомобильным, железнодорожным и морским транспортом.

Наиболее эффективным способом являются мультимодальные перевозки сжиженных газов в контейнерах-цистернах.

Для отработки ряда технологических вопросов с завода производителя сжиженного газа (АГНКС, г. Санкт-Петербург, РФ) и до европейского потребителя (компания «АГА–ГАЗ», г. Лингчепинг, Швеция) в период 11–13 апреля 2006 г. была проведена опытная транспортировка сжиженного природного газа в контейнере-цистерне модели КЦМ-35/0,6 на автомобильном контейнеровозе (тягач с полуприцепом) по маршруту: г. С.-Петербург (Россия) – г. Хельсинки (Финляндия) – морской паром – г. Стокгольм – Лингчепинг (Швеция). Общая протяженность автомобильной трассы и морской паромной переправы составила 1100 км, время в пути – 48 ч, средняя скорость движения по автодорогам – 60–70 км/ч.

При создании контейнера-цистерны КЦМ-35/0,6 разработчиками учитывались требования к ее массогабаритным характеристикам, предписываемые ISO 6346: 1995E, а также Правилами и Инструкциями по перевозке крупногабаритных и тяжеловесных грузов автомобильным автотранспортом по дорогам Российской Федерации, СНГ, Прибалтики и стран Европы. Анализ допускаемых габаритных размеров, полных масс и осевых нагрузок автотранспортных средств в РФ, СНГ, Прибалтике и европейских странах при транспортировке сорокафутовых контейнеров-цистерн показал, что допустимая масса автотранспортного средства, включающая тягач с полуприцепом и сорокафутовый контейнер ISO, может колебаться в диапазоне от 38 т (РФ, Беларусь, Казахстан, Литва) до 42–44 т (Украина, Эстония, Финляндия, Швеция и др.).

Если исходить из этих нормативных требований, принимая во внимание, что масса пятиосного седельного автопоезда (тягач с полуприцепом) составляет 11–12 т и допустимая масса брутто для сорокафутовых контейнеров-цистерн по нормам ISO – 30,48...36 т, то масса контейнера-цистерны с СПГ для экспорта его в Европу не должна превышать 30,48 т.

Это явилось основой для создания контейнера-цистерны модели КЦМ-35/0,6 с вместимостью 35 м³, массой тары 14,95 т и массой транспортируемого продукта 15,53 т.

Следующий важный момент, который нужно учитывать при транспортировке СПГ – соблюдение требований экологической и пожарной безопасности. В связи с этим должны отсутствовать выбросы паров СПГ в окружающую среду из емкости контейнера в процессе его штатной транспортировки. В случае же возникновения аварийной разгерметизации

теплоизоляционной полости емкости необходимо исключить пролив жидкой фазы и организовать безопасное дренирование паров СПГ в атмосферу.

Время бездренажной транспортировки или контрольное время удержания продукта (время между начальным давлением 0,15 МПа и температурой $-156\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлением, при котором в результате теплопритоков откроются предохранительные клапаны при 0,61 МПа) составляет не менее 30 суток. При этом суточная потеря СПГ от испарения по данным эксплуатации не превышает 0,39 %.

Контейнер-цистерна модели КЦМ-35/0,6 оборудована безопасно-дренажным устройством, обеспечивающим безопасное хранение СПГ в емкости за счет газодинамической дестабилизации горения дренажируемого в атмосферу газа при достижении в емкости цистерны предельно допустимого давления в процессе транспортирования. В случае возникновения аварийной ситуации при транспортировании и, как следствие, потери вакуума в теплоизоляционной полости емкости предохранительные устройства защитят сосуд емкости от разрушения и произведут безопасный сброс паров СПГ в атмосферу.

На заводе, производящем СПГ, наполнение контейнера-цистерны КЦМ-35/0,6 производится при условии, когда в емкости устанавливается давление 0,35-0,45 МПа, что обуславливается технологией производства СПГ. Учитывая, что точной информации о системе слива СПГ в хранилище потребителя не было (наличие стационарного насоса или испарителя для создания избыточного давления в емкости), было принято решение не сбрасывать давление до 0,15 МПа, и транспортирование контейнера-цистерны потребителю производить при давлении в ней 0,5 МПа. Как уже отмечалось выше, автомобильный сорокафутовый контейнеровоз, преодолев расстояние 1100 км за двое суток, включая переправу на морском пароме, благополучно прибыл к месту слива СПГ в хранилище потребителя в 40 км от шведского города Лингчепинга (фото 1). При этом давление в емкости контейнера не превысило 0,55 МПа.



Фото 1. Автомобильный контейнеровоз с контейнером-цистерной модели КЦМ-35/0,6 прибыл к месту слива СПГ (г. Лингчепинг, Швеция, 13 апреля 2006 г.)

Технология первоначального слива сжиженного газа из транспортной емкости, не имеющей насоса или испарителя, при падающем давлении паров в газовой подушке емкости в хранилище, в котором поддерживается небольшое противодействие (0,13-0,15 МПа), широко использовалась нами при сливе жидкого водорода из транспортных железнодорожных цистерн ЖВЦ-100М в хранилище ракетно-космического комплекса, где обеспечение сохранения чистоты жидкого водорода при сливе в хранилище было одним из приоритетных.

Для безопасного слива СПГ в хранилище потребителя контейнер-цистерна модели КЦМ-35/06 оборудована следующими защитными устройствами:

– запорно-предохранительным устройством (ЗПУ), предназначенным для отсечки магистрали слива посредством автоматического ее закрывания при случайном передвижении контейнера-цистерны во время слива;

– ЗПУ совместно с противопожарным приводом, обеспечивающим перекрытие сливной магистрали в случае возникновения пожара в районе работ по сливу СПГ;

– скоростными клапанами, используемыми для перекрытия магистрали «слива» при разгерметизации коммуникаций слива у потребителя.

Принятая у потребителя технология слива сжиженного газа в хранилище из транспортной емкости предусматривает минимальные выбросы паров СПГ в атмосферу с точки зрения как экологической безопасности, так и минимизации потерь поставляемого сжиженного газа.

Внешний вид криогенного комплекса хранения и газификации СПГ, компримирования газа, заполнения газовых баллонов, а также его отдельных составляющих характеризуют фото 2-4.



Фото 2. Криогенный комплекс приема, хранения и газификации СПГ:

1 – контейнер-цистерна КЦМ-35/0,6; 2 – хранилище СПГ;

3 – испаритель-теплообменник; 4 – испаритель;

5 – блок запорно-предохранительной арматуры контрольно-измерительных приборов

Комплекс приема, хранения и газификации СПГ (см. фото 2) включает в себя:

– хранилище СПГ вертикального типа с вакуумной порошковой изоляцией (перлит), с нижним сливом продукта объемом 53 м³ и рабочим давлением 1,5 МПа;

– испарители-теплообменники (6 секций с 16-ю трубами в каждой) вертикального типа для газификации поступающего из хранилища газа с последующей подачей его в компрессор;

– испаритель для создания избыточного давления в емкости контейнера-цистерны при сливе сжиженного газа в хранилище;

– блок запорно-предохранительной арматуры и контрольно-измерительных приборов.

Компрессорная станция с заправочными газовыми постами показана на фото 3, а саморазгружающийся трейлер с контейнером газовых баллонов – на фото 4.



Фото 3. Компрессорная станция и заправочные посты газовых баллонов

Следует отметить высокую оперативность и производительность оператора трейлера при проведении разгрузочно-погрузочных работ, а также при заполнении им газовых баллонов в контейнере. Вся технологическая операция заполнения баллонов, включая разгрузку и погрузку контейнера, продолжалась не более 1,5 ч.



Фото 4. Саморазгружающийся контейнеровоз с контейнером газовых баллонов

Контейнер-цистерна КЦМ-35/06 по прибытии на площадку слива (фото 5) криогенного комплекса СПГ в г. Лингчепинг была соединена специалистами ОАО «Уралкриомаш» гибким рукавом «слива-налива» со стационарным хранилищем, имевшим остаток жидкости в емкости в количестве 1,5 т при давлении 0,3МПа, и рукавом «наддув-дренаж» – со стационарным испарителем.



Фото 5. Слив сжиженного природного газа из емкости контейнера-цистерны КЦМ 35/0,6 в стационарное хранилище

На начальной стадии перелив сжиженного газа в хранилище производился при перепаде давлений в стационарной и транспортной емкостях равном 0,25 МПа. Так как дренаж паров из хранилища согласно используемой технологии операторами криогенного комплекса не производился, то после выравнивания давлений в емкостях процесс перелива был приостановлен. За счет подачи жидкости из хранилища в малый испаритель давление в емкости контейнера-цистерны было поднято до максимального рабочего в 0,6 МПа. Это позволило производить отбор газа из хранилища через теплообменник на компрессорную станцию, осуществляющую заполнение баллонов в газовом контейнере. При достижении в хранилище минимально допустимого давления для работы компрессора (0,3 МПа) перелив сжиженного газа был возобновлен.

Для полного опорожнения емкости контейнера потребовалось произвести 4 подобных технологических цикла в течение 4,5 ч. Данная технология в отличие от общепринятой (поддержание постоянного давления в транспортной емкости и минимального давления в хранилище сбросом паров в атмосферу в процессе перелива) более трудоемкая. Однако при этом обеспечивается экономия сжиженного газа и не нарушаются экологические нормы.

В процессе эксплуатации контейнера-цистерны модели КЦМ-35/0,6 были выявлены недостатки, требующие совершенствование конструкции:

- необходимость иметь в составе контейнера-цистерны испаритель «наддува» для слива СПГ у потребителя;
- увеличение объема емкости с 35 м³ до 40 м³ за счет переноса арматурного шкафа с торца емкости на боковую поверхность;
- отработка технологии транспортировки СПГ в части увеличения времени бездренажной транспортировки с 30 суток до 65–75 суток за счет применения ЭВТИ в том числе;
- наличие в емкости волнорезов, обеспечивающих гашение колебания жидкости при транспортировке;
- увеличение пропускной способности скоростного клапана (СК), что позволит сократить время залива СПГ в контейнер-цистерну при ее заполнении.

Указанные замечания и предложения были учтены при создании контейнера-цистерны нового поколения модели КЦМ-40/0,7 объемом 40 м³ и рабочим давлением 0,7 МПа (фото 6).



Фото 6. Контейнер-цистерна модели 40/07

Технические характеристики приводятся ниже:	
Обозначение по кодексу ММОГ.....	UNT75
Обозначение типоразмера по ИСО1496-3:1995.....	1 АА
Габаритные размеры, мм:	
длина.....	12192
ширина.....	2438
высота.....	2591
Максимальная масса брутто, т.....	30,48
Масса тары, т.....	12,57
Масса транспортируемого продукта, т.....	14,2
Вместимость, м ³	40
Максимально допустимое рабочее давление, МПа.....	0,7
Тип изоляции.....	экранно-вакуумная
Суточные потери от испарения, % сутки.....	0,54
Материал:	
сосуда.....	сталь 12Х18Н10Т
оболочки.....	сталь 09Г2С-14
Время бездренажного хранения	
при подъеме давления от 0,15 до 0,6 МПа, сут	60
Арматура.....	Фирма «Herose»
Управление рабочими операциями.....	Ручное
Температурный диапазон эксплуатации, °С.....	От –40 до +50
Назначенный срок службы, лет.....	20
Выдача продукта	Надув емкости посредством собственного испарителя

Анализ опытной транспортировки, используемой технологии перелива в хранилище потребителя сжиженного природного газа из контейнера-цистерны подтвердил реальную осуществимость экспорта СПГ из европейской части России в страны Северной и Центральной Европы, такие как Швеция, Финляндия, Польша, Германия и др.

Рассматривая поставку СПГ в Европу в контейнерах-цистернах автомобильным и морским транспортом как составляющую мультимодальных перевозок сжиженного газа в целом, а также реальную осуществимость транспортировки этой модели по железной дороге, можно надеяться, что это вызовет интерес к экспорту сжиженного природного газа из Западно-Сибирского региона Российской Федерации.

Библиографический список

1. Черемных О.Я., Рачевский Б.С. Целесообразность экспорта СПГ с малотоннажных заводов СПГ. Газовая промышленность, 2017, № 6.– С. 82–85.
2. Черемных О.Я. Транспортировка и хранение сжиженного природного газа. IVПетербургский международный газовый форум. С.-Петербург, 2014. – С. 16.
3. Черемных О.Я., Зашляпин Р.А., Бебелин И.Н. Способ хранения сжиженного природного газа в транспортной емкости. Пат. № 2002990 Российская Федерация, 1993, бюл. № 41–42. – 7 с.
4. Черемных О.Я. Особенности мультимодальных перевозок на экспорт СУГ и СПГ в контейнерах-цистернах. Автозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2009, № 2. – С. 53–58.

Решение практических задач в области разработки альтернативного нефтяного оборудования

Чистов Д. И., канд. тех. наук
УГНТУ, г. Уфа

Пыстогов А. А., канд. экон. наук, доц.
НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил

Вопрос ре-инжиниринга импортного оборудования и запасных частей к нему, или как его именуют в СМИ – «импортозамещение», в последние несколько лет является высоко актуальным в нефтяной промышленности. Причем, речь идет о применении новых отечественных технологий и материалов, позволяющих снизить стоимость оборудования, при одновременном увеличении долговечности его работы. В данной работе представлен практический опыт альтернативного подхода в производстве нефтепромыслового оборудования и запасных частей к нему

Ключевые слова: импортозамещение, альтернативное нефтегазопромысловое оборудование, инженерное решение

На протяжении последних десятилетий российские нефтегазовые компании решали перманентно возникающие задачи модернизации основных фондов оборудования в основном, за счет приобретения импортных образцов. На сегодняшний день спектр подобного оборудования является достаточно широким. При этом, геополитическая ситуация диктует острую необходимость разработки и опытно-промышленной апробации альтернативных, отечественных аналогов оборудования. Не только не уступающего западной продукции, но и превосходящей по основным техническим показателям, с акцентом на собственные технологии и конструкционные материалы.

В данной статье приведены некоторые технические решения задач в области разработки альтернативного нефтегазопромыслового оборудования и запасных частей к нему. Рассмотрены: конструкция понижающей трансмиссионной секции погружного винтового электронасоса для добычи высоковязких нефтей, представляющей собой двухступенчатую зубчатую передачу со связными колесами; представлено готовое технологическое решение для изготовления базовых деталей червячно-цевочного механизма, применяемого в устройстве работающем по технологии «Скважинный трактор ®»; в пилотном варианте приведено инженерное решение проблемы поставок запасных частей и комплектующих для импортных поршневых насосов, за счет изготовления пары трения скольжения, работающей

в условиях гидроабразивного износа, с использованием финишного термоупрочнения, по технологии плазменной дуги прямого действия.

В настоящее время на нефтяных промыслах эксплуатируются установки системы ESCPS (Electric Submersible Cavity Pump Systems), которые комплектуются погружной трансмиссионной секцией (понижающим редуктором). На сегодняшний день, подобные установки выпускают такие известные фирмы как «Baker Hughes», «Canaross», «Schlumberger» и другие.

Авторами [1] разработана альтернативная трансмиссионная секция установки ESCPS, содержащая соосную зубчатую передачу со связными, коррегированными колесами. Предлагаемая конструкция, в отличие от известных аналогов, имеет «псевдоциркуляционную» систему смазки и «плавающую» установку шестерни и центрального зубчатого колеса.

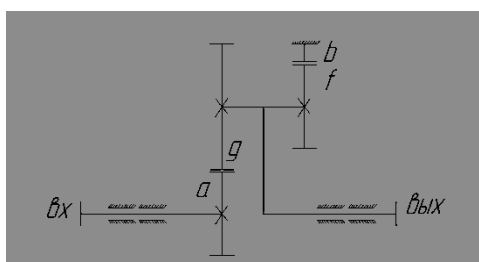


Рисунок 1. Кинематическая схема двухступенчатой трансмиссионной секции

При проектировании конструкции, с целью обеспечения необходимого значения коэффициента ширины зубчатых венцов, материалом колес была назначена Сталь 38ХМЮА «азотирование», НВ670, позволившая получить значения допускаемых контактных напряжений 625...700 МПа.

Технология «Скважинный трактор» возникла с целью увеличения дальности проникновения вглубь ствола. Производителями оборудования для осуществления данной технологии являются такие компании, как «Welltec» и «Schlumberger».

При разработке альтернативной конструкции [2] была проанализирована возможность применения различных механических передач с ортогональными осями (коническая, червячная, гипоидная и т.д.). На основании ориентировочных расчетов и конструктивных особенностей устройства, было принято решение об использовании в качестве понижающей передачи – червячно-цевочного механизма с двумя лобовыми колесами (рисунок 2), позволяющего получить большое передаточное число u в ограниченном диаметральном пространстве корпуса трактора.

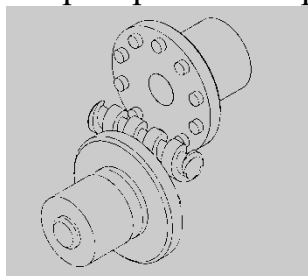


Рисунок 2. Общий вид червячно-цевочного механизма

В качестве проверочного расчета, рассматривалась задача оценки напряженно-деформированного состояния цевок механизма в программной среде ANSYSWorkbench.

Были рассмотрены различные варианты сочетания материалов для изготовления деталей червячно-цевочной передачи и определены значения эквивалентных напряжений в зацеплении червяка и цевок, каждого из лобовых колес (рис. 3).



Рисунок 3. Напряжения, действующие на три монолитные цевки

Установлено, что вариант изготовления монолитных лобовых колес и червяка из твердого сплава ВК-8ВК, является наиболее оптимальным, с точки зрения технологичности изготовления и обеспечения условия прочности.

Следует отметить, что помимо создания альтернативных конструкций, так же остро стоит проблема обеспечения запчастями и расходными комплектующими для импортного оборудования. Авторами были выполнены работы по ре-инжинирингу пары «Втулка-Поршень» бурового насоса F-1000 (производства КНР). Геометрические размеры пары были получены 3D- сканированием на российском оборудовании «Rangevision». Цилиндровая втулка к указанному насосу является биметаллической, поэтому особый интерес представляли физико-механические характеристики чугуна «вкладыша». Был проведен металлографический анализ шлифов деталей втулки и остова поршня. На основании анализа всех исследований, в том числе базы данных «TotalMateria®», было предложено изготавливать монометаллической втулки. Для повышения эксплуатационного ресурса рабочей поверхности выбран способ поверхностной термообработки плазменной дугой прямого действия [3]. Не изменяя параметров шероховатости поверхности, такая термообработка легко встраивается в технологический процесс изготовления деталей, являясь финишной операцией, достаточно производительна и позволяет увеличить эксплуатационную стойкость изделия в условиях гидроабразивного износа.

Библиографический список

1. Патент 170007 РФ, МКП F04C2/107 Трансмиссионная секция установки погружного винтового насоса / Д.И. Чистов, Э.А. Щеглов, О.С. Иванов ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО УГНТУ - № 2016133508; заявл. 15.08.2016 ; опубл. 11.04.2017. – 6 с.
2. Патент 164586 Российская Федерация, МКП E21B23/08 Устройство для проведения внутрискважинных работ [Текст]/ Чистов Д.И., Ильин С.В., Пономарев В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО УГНТУ - № 2016107478; заявл. 01.03.2016; опубл. 10.09.2016. – 7 с.
3. Сафонов Е.Н. Плазменная закалка деталей машин.- Нижний Тагил: Изд-во НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 116 с.