

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации



СВАРКА РЕНОВАЦИЯ ТРИБОТЕХНИКА

Материалы

IX Уральской научно-практической конференции

Нижний Тагил
2019

УДК 621.791.92 + 621.791:621.785

ББК К65 + К644

С24

Редколлегия:

д-р техн. наук, проф. В. А. Коротков,
д-р техн. наук, проф. В. Ф. Пегашкин,
д-р техн. наук, проф. Е. Н. Сафонов

СВАРКА. РЕНОВАЦИЯ. ТРИБОТЕХНИКА: материалы девятой Уральской научно-практической конференции / отв. ред. В. А. Коротков ; М-во науки и высшего образования РФ ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2019. – 170 с.

В сборнике представлены доклады научно-практической конференции НТИ (филиал) УрФУ, затрагивающие актуальные вопросы сварочного производства, восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей.

Материалы могут быть полезны специалистам промышленных предприятий и организаций, студентам и аспирантам, а также использованы при проведении работы по профессиональной ориентации.

Представленные материалы опубликованы в авторской редакции.

ISBN 978-5-9544-0094-6

УДК 621.791.92 + 621.791:621.785

ББК К65 + К644

ISBN 978-5-9544-0094-6

© Авторы статей, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

ПЛЕНАРНАЯ ЧАСТЬ

<i>Потанин В. В.</i> Исследования в области реновации и упрочнения в НТИ (филиал) УрФУ.....	6
<i>Грузман В. М.</i> Из истории литейного производства Уралвагонзавода.....	11
<i>Сафонов Е. Н.</i> Подготовка специалистов сварочного производства в Нижнетагильском технологическом институте.....	14
<i>Стрельцова И. П.</i> Совершенствование форм реализации дополнительного профессионального образования в условиях требований современного производства.....	18
<i>Дубровская Е. А., Плещев В. П.</i> Проблемы инновационного развития интеллектуальной собственности.....	24

СВАРКА

<i>Анахов С. В., Матушкин А. В.</i> Новые конструктивные способы повышения эффективности плазменной резки металлов.....	30
<i>Гараев Р. Р., Курынцев С. В.</i> Особенности использования металл-полимер гибридных соединений.....	36
<i>Давыдов А. Ю., Давыдов Ю. С.</i> Сравнение параметров плавления высокохромистой порошковой проволоки при дуговой сварке с наложением импульсов и с естественными короткими замыканиями.....	40
<i>Плаксина Л. Т., Глухих А. В.</i> Оптимизация технологии изготовления конвективной части водогрейного котла с применением способов сварки давлением.....	46
<i>Сидоров В. П.</i> Об определении понятия наплавленного металла.....	53
<i>Сидоров В. П., Советкин Д. Э.</i> Наплавка покрытыми электродами дугой, питаемой разнополярными импульсами тока.....	58
<i>Сидоров В. П.</i> К расчету режимов односторонней сварки под флюсом.....	63
<i>Смоленцев А. С.</i> Новый материал для дуговой сварки высокопрочных среднелегированных сталей...	70
<i>Солопова Е. А.</i> Выбор варианта технологии сварки толстостенных трубопроводов для районов Западной Сибири и Крайнего Севера.....	76

Хайбрахманов Р. У., Коробов Ю. С.

Компьютерное моделирование деформаций в тонколистовых конструкциях из высокопрочных сталей..... 82

Чудинов А. А.

Инновационный подход к ремонтной сварке..... 87

РЕНОВАЦИЯ

Веснин А. М.

Восстановление деталей дробилок..... 92

Голенков В. Н.

Примеры омолаживающих ремонтов..... 95

Исупов Ю. Д.

Исследование техногенных образований в черте Нижнего Тагила..... 97

Коротков В. А.

«Омолаживающие» ремонты как веление времени 100

Татаринцев В. А., Толстошеев А. К.

Применение технологий реновации на различных стадиях жизненного цикла литых деталей вагонов..... 105

Шерстобитов А. В.

Технология восстановления захватов «GLAMA»..... 112

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТРИБОТЕХНИКА

Алван Х. Л., Коробов Ю. С.

Сравнение стойкости против кавитации и абразивного износа наплавленных слоев из сталей 06X19H9T и Fe-Cr-Ti-Al..... 117

Гирфанова А. Г.

Исследование абразивных методов снижения шероховатости поверхности деталей, полученных с использованием аддитивных технологий..... 122

Гумеров А. К.

Новые задачи механики разрушения неоднородных тел..... 127

Гумеров А. К., Шрон Л. Б.

Напряженное состояние и прочность элементов конструкций из разнородных материалов..... 133

Зубко Д. А.

Рациональное применение плазменной закалки..... 139

Кантемиров И. Ф., Сильвестров С. А.

Изменения в металле трубопроводов при длительной эксплуатации..... 144

Коротков В. А.

Упрочняющее тонкопленочное покрытие..... 151

Купцов С. Г., Плещев В. П., Магомедова Р. С., Шимов В. В.

Упрочнение поверхности как способ повышения работы деталей машин на примере стали 09Г2С..... 154

<i>Максимов В. Н.</i>	
Карбонитрация направляющих протяжного станка.....	158
<i>Мерсон Д. Л., Караванова А. А.</i>	
Металлографическая экспертиза как важный элемент оценки качества машиностроительной продукции.....	161
<i>Пегашкин В. Ф., Осипенкова Г. А.</i>	
Образование регулярного микрорельефа поверхностного слоя детали при УЗВК.....	166

УДК 621-05; 621.791

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ РЕНОВАЦИИ И УПРОЧНЕНИЯ В НТИ (ФИЛИАЛ) УрФУ

В. В. Потанин, директор

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил, Россия

Аннотация. В текущем 2019 году Нижнетагильскому филиалу УрФУ исполняется 75 лет. Одним из значимых событий в его истории стало формирование в 70-80 годах научного направления по восстановлению и упрочнению деталей оборудования, которое продолжает развиваться, свидетельством чему является проведение настоящей 9-ой конференции СРТ.

Ключевые слова: сварка, наплавка, механообработка, износостойкость.

В 50-х гг. прошлого века осознали, что причиной большей части (80%) отказав машин и оборудования, является износ. В Англии, в связи с этим, в 60-х гг. учредили новую дисциплину – Трибологию, у нас же на Урале профессор М. И. Разиков создал в УПИ (ныне УрФУ), при финансировании Минцветметом СССР, «Отраслевую лабораторию наплавки». Наплавка рассматривалась как удобный и экономичный способ восстановления рабочих поверхностей деталей и штампов с одновременным приданием им свойства износостойкости. Это научное направление 70-80-е гг. стали развивать в Нижнетагильском филиале УПИ, руководитель доцент, к.т.н. И. А. Толстов.

В 70-е гг. выполнены исследования деформаций при сварке и наплавке, позволившие разработать и внедрить новые технологии при ремонтах трамвайных вагонов (Н. Тагил) и упрочнении бурильных геологоразведочных труб (ПО «Уралгеология»), которые были отмечены медалью ВДНХ и Премией Свердловского обкома ВЛКСМ. Тогда же выработана стратегия исследований в области поверхностной закалки плазменной дугой, практические результаты которой пришлось на 80-е годы. Плазменную закалку впервые в отрасли внедрили на Нижнетагильском металлургическом комбинате для упрочнения роликов рольгангов и прокатных валков [1, 2]. Особенно значимым было упрочнение ею роликов рельсо-правильной машины (исп. А. А. Бердников). В это время комбинат осваивал выпуск тяжелых рельсов Р65 вместо Р50, что привело к ускоренному выходу из строя правильных роликов. Связанные с их нехваткой простои вызвали невыполнение плана рельсовых поставок. Известные приемы повышения стойкости роликов (замена марки стали и режимов термообработки) оказались неэффективны, что подтолкнуло

руководство комбината к опробованию, *тогда практически неизвестной, технологии плазменной закалки*. Решение оказалось верным, применение плазменной закалки в 3 раза увеличило стойкость роликов и устранило срывы плана поставок [3].

В 80-е гг., проводились исследования по предупреждению трещин при наплавке массивных деталей, и сотрудник В. И. Журавлев был включен в состав коллектива, удостоенного Госпремии СССР по программе «Валок».

Горно-обогащительное и металлургическое оборудование ремонтируется прямо по месту его эксплуатации, что делает актуальным сокращение сроков ремонтов. Особенную остроту данная проблема приобрела после дефолта 1998 г., когда началось промышленное оживление, но в наличии имелось лишь давно не отремонтированное оборудование. С целью ускорения ремонтной сварки впервые в отрасли начато применение мобильных полуавтоматических постов, что одновременно с увеличением производительности давало повышение качества сварных соединений [4, 5].

В начале 2000-х гг. Уралвагонзавод впервые за 10 лет простоя получил госзаказ на поставку вагонов, но его выполнение сдерживало отсутствие технологии износостойкой наплавки автосцепок и выход из строя ковочной машины для производства вагонных осей. Обе проблемы были успешно решены под руководством проф. В. А. Короткова и послужили основанием к созданию в 2003 г. на Уралвагонзаводе «Бюро триботехники», затем преобразованного в «Отдел триботехники и нанотехнологий».

В нулевые годы 21 века продолжалось совершенствование плазменной закалки. Был разработан новый способ и установка (УДГЗ-200, info@1m63.ru), сделавшие плазменную закалку доступной ручному применению. Сварщик получил возможность, как маляр кистью, добираться горелкой до самых труднодоступных мест, и закалывать то, что ранее было невозможно. Установка в 2008 г. отмечена медалью Женевского салона изобретений и инноваций, а двое ее соразработчиков – Премией Губернатора для молодых ученых. Высокая эффективность плазменной закалки прослеживается на различных марках сталей и чугунов. Корпорация ВСМПО-АВИСМА, чтобы обеспечивать экспортную точность штамповок, 100 % своих штампов подвергает плазменной закалке установкой УДГЗ-200 [6-12].

Карбонитрация, подобно плазменной закалке, является финишной технологией упрочнения, сокращающей трудоемкость и стоимость изготовления упрочненных деталей. Не смотря на то, что она была

разработана в СССР еще 50 лет назад, в производстве широко не использовалась. В связи с этим было исследовано ее влияние на износостойкость и изменения размеров деталей в ходе карбонитрации, разработана экономичная методика контроля качества переносными приборами [13, 14]. Карбонитрация запчастей буровых станков дала сокращение их ремонтных простоев, и позволила на Качканарском ГОКе увеличенный на 15 % план бурения выполнять уменьшенным на 5 % парком станков [15].

Наплавка сопровождается образованием остаточных напряжений и деформаций. Как правило, они нежелательны, поэтому применяют меры для их предотвращения. Исследование остаточных напряжений подсказало возможность их рационального использования. Цапфы в торцевых стенках мельниц на Качканарском ГОКе после 10 лет работы получили износ и были восстановлены наплавкой. Еще через 10 лет работы вновь приступили к их наплавке, но в наплавленном слое стали появляться трещины. Тогда для их предупреждения технологию наплавки скорректировали так, чтобы в наружном слое наводились напряжения сжатия, которые устранили появление трещин. Это позволило восстановить цапфы для третьего нормативного срока эксплуатации [16]. Была также разработана методика правки остаточными напряжениями искривленных валов, плунжеров, осей [17]. Кроме того, совершенствование наплавки проводилось разработкой нового наплавочного материала [18], ультразвуковым воздействием [19, 20], применением финишной плазменной закалки [21] и пластического деформирования [22, 23], использованием электроискровой технологии [24, 25].

С 2001 г. организуется, сообразная выше приведенным исследованиям, серийная (раз в два года) научно-практическая конференция «Сварка. Реновация. Триботехника». Выездные лекции-семинары по данной теме проведены на ведущих предприятиях Урала: Качканарском и Высокогорском горно-обогатительных комбинатах, Нижнетагильском, Челябинском и Магнитогорском металлургических комбинатах, корпорациях Уралвагонзавод, ВСМПО-АВИСМА и др. По данному направлению защищено пять кандидатских (М. Ю. Зашляпин, А. К. Толстобров, В. И. Журавлев, Г. Е. Трекин, Т. М. Гаврилова) и три докторских диссертации (В. А. Коротков, О. И. Шевченко, Е. Н. Сафонов). Активная научная работа в области упрочнения и восстановления деталей привела к разработке и преподаванию с 1989 г. новой дисциплины «Износостойкость машин».

Благодаря ей, будущие инженеры стали изучать не только то, как проектировать машины (Теория механизмов и машин), не допускать их поломок (Сопромат, Детали машин), но и как защищать от быстрого износа [26].

Литература

1. Восстановление и упрочнение роликов рольгангов / В. А. Коротков, Л. В. Баскаков, И. А. Толстов, А. А. Бердников // Сварочное производство. – 1991. – № 3. – С. 31-33.
2. Журавлев В. И. Поверхностное упрочнение железоуглеродистых сплавов дуговой закалкой / В. И. Журавлев, Е. Н. Сафонов // Сварочное производство. – 1997. – № 10. – С. 30-32.
3. Коротков В. А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями. / В. А. Коротков, А. А. Бердников, И. А. Толстов. – Челябинск : Металл, 1993. – 144 с. (Стр. 94-99).
4. Коротков В. А. Опыт применения сварочных полуавтоматов на предприятиях Уральского региона // Сварочное производство. – 2004. – № 3. – С. 32-36.
5. Коротков В. А. Из опыта эффективного использования механизированной сварки в среде аргона / В. А. Коротков, В. Н. Максимов, В. П. Сумеркин // Сварка и диагностика. – 2008. – № 4. – С. 25-27.
6. Коротков В. А. Свойства и промышленное применение ручной плазменной закалки // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2016. – № 8 (734). – С. 3-9.
7. Злоказов М. В. Влияние плазменной закалки на износостойкость и структуру стали 7Х3 / М. В. Злоказов, В. А. Коротков // Технология машиностроения. – 2016. – № 4. – С. 5-8.
8. Коротков В. А. Влияние термической обработки на износостойкость сталей 45 и 40Х // Вестник машиностроения. – 2016. – № 8. – С. 48-51.
9. Коротков В. А. Влияние плазменной закалки на коррозионную стойкость хромистой стали // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 9. – С. 45-46.
10. Коротков В. А. Влияние плазменной закалки на износостойкость стали 38ХС // Трение и износ. – 2017. – Т. 38, № 4. – С. 346-350.
11. Коротков В. А. Исследование эффективности плазменной закалки крановых рельс // Вестник машиностроения. – 2018. – № 3. – С. 42-44.
12. Коротков В. А. Исследование износостойкости легированных сталей, упрочненных плазменной закалкой // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 5. – С. 47-48.
13. Коротков В. А. Исследование процесса карбонитрации // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 8. – С. 11-14.
14. Коротков В. А. Карбонитрация как средство снижения износа деталей металлургического оборудования // Металлург. – 2015. – № 12. – С. 63-68.
15. Коротков В. А. Техничко-экономическая эффективность карбонитрации // Вестник машиностроения. – 2017. – № 9. – С. 68-71.
16. Коротков В. А. Восстановление торцевых стенок мельниц наплавкой // Сварочное производство. – 2014. – № 4. – С. 37-40.

17. Коротков В. А. Правка длинномерных цилиндрических деталей термопластическим деформированием / В. А. Коротков, А. А. Пыстогов // Вестник машиностроения. – 2015. – № 4. – С.52-54.
18. Коротков В. А. Исследование наплавки плунжеров насосов высокого давления // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2017. – № 1-2. – С. 46-48.
19. Влияние толщины режущего слоя и отпуска на износостойкость резцов, наплавленных порошком Р6М5 с ультразвуковым воздействием / Г. Е. Трекин, О. И. Шевченко, Т. М. Гаврилова, В. М. Фарбер // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 10. – С. 25-27.
20. Шевченко О. И. Формирование структуры и свойств композиции «наплавленный слой - основной металл» в ультразвуковом поле / О. И. Шевченко, Г. Е. Трекин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 124-132.
21. Коротков В. А. Плазменная закалка слоя наплавки 30ХГСА // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – № 5. – С. 19-21.
22. Коротков В. А. Исследование поверхностного пластического деформирования наплавленного металла // Вестник машиностроения. – 2014. – № 3. – С.76-77.
23. Осипенкова Г. А. Повышение износостойкости деталей поверхностным пластическим деформированием с помощью ультразвуковых крутильных колебаний / Г. А. Осипенкова, В. Ф. Пегашкин, И. Е. Филимонов // Вестник машиностроения. – 2009. – № 2. – С. 74-76.
24. Поверхностное упрочнение деформирующего инструмента методом электроискрового легирования / Г. И. Астафьев, Е. М. Файншмидт, О. И. Шевченко, П. Ю. Поломошнов, Д. А. Крашенинников // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2011. – № 4. – С. 26-31.
25. Коротков В. А. Применение электроискровой обработки при ремонте механического оборудования // Вестник машиностроения. – 2018. – № 1. – С. 77-81.
26. Коротков В. А. О целесообразности преподавания в вузах инженерной дисциплины «Износостойкость машин» // Вестник машиностроения. – 2006. – № 4. – С. 71-72.

УДК 621.746

ИЗ ИСТОРИИ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА УРАЛВАГОНЗАВОДА

В. М. Грузман, д-р техн. наук, vguzman@mail.ru

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил, Россия

***Аннотация.** Применение чрезмерно большого (35-т) ковша для отливки деталей среднего развеса (до 0,5 т) приводит к повышенному браку по «засору». Показано, что использование 35-т ковша на Уралвагонзаводе в военное и довоенное время оправдывалось одновременной отливкой как массивных слитков, так и фасонных отливок. С переходом только на фасонное литье стала целесообразной его замена на 17-т ковш, который был предусмотрен американским проектом 30-х годов.*

***Ключевые слова:** ковши, разливка стали, брак, засор, песчаные раковины, отливки, фасонные отливки.*

Мелкие песчаные раковины (засор) главный дефект при литье в песчаные формы, в которых получают порядка 80-85 % отливок, прочность которых намного меньше силового воздействия потока расплава, заполняющего форму. Кинетическая энергия расплава и, соответственно, степень эрозии (размыва) поверхности песчаной формы тем больше, чем больше скорость расплава. При заливке форм из стопорного ковша скорость входа расплава в полости формы определяется объемом ковша. На Уралвагонзаводе, в цехе стального литья развесом до 500 кг, заливка форм осуществляется из стопорного ковша большого объема – 35 тонн. Как следствие, брак по засору составляет более 50 % от всего спектра брака. С вероятностью близкой к достоверности можно утверждать, что нигде такие большие ковши для мелкой разливки не применяются; из ковшей большого объема заливают лишь многотонные отливки. Возникло предположение, что этот ковш не был заложен в проекте завода по производству вагонов, а появился в цехе во время Великой Отечественной войны, когда в оборонных целях потребовалось выполнять массивные отливки. С наступлением мирного времени вновь началась отливка мелких вагонных отливок (до 0,5 т), и большой (35-т) ковш стал причиной значительного брака. В этих условиях делались предложения по замене ковша большого объема на ковш меньшего объема. Приводились расчетные и экспериментальные обоснования, что такая замена решительно уменьшила бы литейный брак по «засору». Но эти доводы оказались невоспринятыми.

Начались поиски документа об объеме первоначального разливочного ковша, который мог бы подтвердить целесообразность уменьшения объема действующего ковша. Были опрошены технологи, кадровые работники цеха,

изучена технологическая документация, паспорта действующих ковшей и грузоподъемных кранов разливочного участка. В архивах литейных и мартеновского цехов довоенных документов не оказалось, но в заводском музее обнаружили воспоминания главного инженера завода Алексея Васильевича Забайкина, во время войны – технолога цеха крупного фасонного литья. Он пишет: «Серьезный вопрос увеличения выплавки жидкой стали; четыре мартеновских и такое же количество электросталеплавильных печей не обеспечивали потребность завода. 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 мартеновских печей, с 36 до 60 тонн*» [1]. Конечно, мероприятия по увеличению объема выплавки стали могли привести к увеличению емкости ковша до 35 тонн, однако точная информация об этом у Алексея Васильевича отсутствовала.

Поиск прямой информации об объеме довоенного разливочного ковша продолжился в Нижнетагильском государственном историческом архиве (НТГИА). Здесь, в годовых отчетах о работе цеха от пуска в 1936 г. и до апреля 1941 г., прямо указано, что для разливки мартеновской стали использовали ковши емкостью 35 тонн. Точно установив, что 35-т ковш был установлен до войны, выдвинули новую гипотезу *о присутствии других чрезвычайных обстоятельств*, вызвавших применение 35-т ковша. Гипотеза подтвердилась свидетельством известного историка Сергея Викторовича Устьянцева [2]. Оказалось, что решение о строительстве завода по американской технологии было принято в 1928 г., но т. к. дипломатических отношений с США тогда не было, то комплектующие покупалась у разных владельцев в разное время. В результате получилось, что мартеновские печи были запущены, когда формовочного оборудования еще не было. В это же время на Ново-Тагильском металлургическом заводе (НТМЗ) сдали в эксплуатацию бандажный стан, на три года раньше мартеновских печей. Поэтому было принято решение использовать сталеплавильные мощности Уралвагонзавода для обеспечения слитками бандажного стана НТМЗ. Это логично объяснило применение на Уралвагонзаводе ковша большого объема.

Всего в 1936 г. на Уралвагонзаводе было отлито и отправлено на НТМЗ и другим потребителям 20515 т слитков мартеновской стали. В 1937 г. было выплавлено 60944 т стали, из которой 22941 т – больших отливок и 13801 т – малых, фасонных. Производство одновременно тяжелых слитков и мелкого

фасонного вагонного литья требует определенного порядка заливки. Вероятно, литье слитков осуществлялась перед заливкой фасонных форм. В этом случае после заливки 6-ти слитков весом 2,5 т каждый уровень металла в ковше, а, следовательно, и его металлостатический напор, падал до уровня ковша емкостью 15 т. Это обеспечивало приемлемую (не вызывающую разрушения песчано-глинистой формы) литейную скорость 3,8 м/с и низкий процент литейного брака.

Гипотеза о военном происхождении 35-т ковша не подтвердилась. Но остался без ответа главный научный вопрос настоящего исследования: какой ковш был заложен в проекте завода? С. К. Устьянцев уверял, что проект завода до сих пор засекречен. Но через некоторое время, впервые и случайно встретившийся мне, председатель городского клуба краеведов Алексей Хлопотов подсказал, что проект «Вагонки» находится в исторической библиотеке нашего Краеведческого музея. Я посетил эту библиотеку и убедился, что в проекте завода заложен 17-т ковш.

Документальное подтверждение, что оптимальным для фасонных вагонных отливок является ковш объемом 17 тонн, не привело к ожидаемым результатам. Замена 35-т на оптимальный 17-т ковш не входит в заводские планы. Хотя такая модернизация способна была не только привести к уменьшению брака, но и смогла бы оптимизировать другие процессы.

Литература

1. Забайкин А. В. Металлурги и легендарный танк Т-34 // Тагильский краевед. – 1995. – № 15. – С. 20.
2. Устьянцев С. В. Очерки отечественной индустриальной культуры XX века : в 3-х т. – Т. 1. Уральский Вагоностроительный Завод / ОАО «НПК Уралвагонзавод». – Нижний Тагил, 2009. – С. 211-214.

УДК 621.791:378

**ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ СВАРОЧНОГО
ПРОИЗВОДСТВА
В НИЖНЕТАГИЛЬСКОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

Е. Н. Сафонов, д-р техн. наук, sen@ntiustu.ru

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил, Россия

***Аннотация.** Представлены сведения об истории развития подготовки специалистов сварочного производства в Нижнетагильском технологическом институте (филиал) УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, формировании научно-педагогических кадров, образовательной и научно производственной деятельности кафедры.*

***Ключевые слова:** оборудование сварочного производства, технология сварочного производства, подготовка специалистов, научно-педагогические кадры, специалитет, бакалавриат, магистратура, инженеры, индивидуальная траектория обучения.*

Первый выпуск инженеров по специальности «Оборудование и технология сварочного производства» состоялся в Нижнетагильском филиале УПИ в 1968 г. по очно-заочной (вечерней) форме обучения. Профессиональную подготовку по специальности в то время обеспечивал небольшой коллектив преподавателей с помощью специалистов Уралвагонзавода и Уральского политехнического института. За несколько последующих лет, при активном участии доцента И. А. Толстова, сложился собственный коллектив преподавателей, была создана необходимая лабораторная база, подготовлено методическое обеспечение, что позволило в 1972 г. организовать обучение и на дневном отделении в рамках многопрофильной кафедры «Специальное машиностроение».

С 1978 г. подготовка инженеров по специальности ОТСП велась на кафедре «Технология машиностроения и сварочное производство», первым заведующим которой был доцент, к.т.н. М. Н. Лобанов.

В тоже время началось формирование основ научного направления по использованию сварочных технологий для восстановления и упрочнения деталей машин. Под руководством И. А. Толстова в 1971-1993 гг. выполнен целый ряд исследований по восстановлению и упрочнению деталей наплавкой и напылением, разработке технологий электрошлакового переплава, плазменной резки, плазменно-механической и других высокопроизводительных процессов обработки высокопрочных покрытий, производства сварочных и наплавочных материалов и др. Результаты этих работ нашли отражение в четырех монографиях, вышедших в издательствах

«Металлургия» и «Машиностроение». Кроме того, было опубликовано более 100 статей и научных докладов, сделано более 20 изобретений.

В ходе выполнения научно-исследовательских работ была создана лабораторная база, сформирован научно-педагогический коллектив, способный решать научно-технические проблемы в области сварки и упрочняющих технологий. Так для выполнения целевой программы ГКНТ СССР по созданию новых способов изготовления прокатных валков на кафедре был создан научный коллектив с госбюджетным финансированием под руководством ст.н.с. В. И. Журавлева, которым, в сотрудничестве с представителями УПИ и НТМК, разработаны и внедрены технологии восстановления валков импортной поставки из заэвтектоидных сталей. Результаты этих работ удостоены серебряной медали ВДНХ и Государственной премии СССР в 1990 г.

Научные сотрудники и выпускники специальности ОТСП института защитили кандидатские (Е. Н. Сафонов, М. Ю. Зашляпин, В. И. Журавлев, В. А. Коротков, О. И. Шевченко, А. К. Толстобров, Г. Е. Трекин) и докторские (В. А. Коротков, Е. Н. Сафонов) диссертации. Накопленный научно-педагогический потенциал позволил в 1995 г. создать специализированную кафедру «Сварочное производство и упрочняющие технологии» (зав. кафедрой д.т.н., ст.н.с. Е. Н. Сафонов), выпускавшую инженеров-механиков для сварочного производства с углубленной подготовкой в области упрочняющих технологий. Коллектив кафедры был сформирован из выпускников специальности ОТСП, получивших опыт научной и педагогической работы в институте. В 1989 г. впервые в стране на кафедре разработана и начала преподаваться дисциплина по обеспечению износостойкости машин – «Методы упрочнения», что логично вытекало из научного профиля кафедры.

В 1997 г. в Нижнетагильском институте (филиале) УПИ был выпущен тысячный инженер по специальности «Оборудование и технология сварочного производства». С 1997 г. кафедра проводила целевую подготовку специалистов для НТМК по дополнительной образовательной программе «Ремонт, техническое обслуживание и реновация металлургических машин». В 1998-2001 гг. по этой программе подготовлено и направлено на НТМК 16 молодых специалистов, выполнено 57 дипломных проектов.

Сотрудниками кафедры под руководством профессора В. А. Короткова в 1990-2000 гг. проведен комплекс исследований по разработке новых технологий реновации металлургического оборудования (ролики и другое

оборудование МНЛЗ, детали энергетического и горного оборудования, плунжеры гидронасосов, прокатное и сменное оборудование и др.).

Внедрение этих технологий проводилось путем изготовления и поставки отремонтированных и упрочненных деталей в рамках первого на Урале предприятия по наплавке. Внедрение комплекса инжиниринговых услуг по реновации металлургического оборудования явилось качественно новой ступенью во взаимоотношениях науки и производства. Кроме того, в этот период выполнены исследования по контрактам с Болгарией и Китаем, опубликована монография по наплавке прессового инструмента.

В 2001 г. совместно с предприятием «Инженерный центр сварочных технологий» (директор В. А. Коротков) в институте проведена двадцатая юбилейная научно-техническая конференция «Сварка Урала – 2001» с международным участием. В работе конференции участвовали около 200 специалистов Урала, России и зарубежья. Профессор В. А. Коротков удостоен премии Черепановых за разработки в области сварки и смежных технологий, за создание первого на Урале специализированного предприятия по наплавке и упрочнению.

В 2003 г. в результате сотрудничества с ФГУП «ПО «Уралвагонзавод» на нем было организовано первое в России «Бюро триботехники» – специальное подразделение по обеспечению износостойкости выпускаемой продукции, а В. А. Коротков назначен его научным руководителем.

В 2010-2014 гг. кафедра успешно представляла Уральский федеральный университет во всероссийском эксперименте, проведенном в соответствии с постановлением Правительства РФ, по созданию прикладного бакалавриата. Участники эксперимента, определенные на основании конкурсного отбора, разрабатывали и тестировали свои образовательные программы во взаимодействии с работодателями для повышения качества профессионального образования для удовлетворения возрастающих потребностей рынка труда.

Всего за период подготовки инженеров по моноуровневой системе высшего образования в институте выпущено более двух тысяч специалистов сварочного производства, многие из которых достигли значительных высот в профессиональной сфере и общественно-политической деятельности.

Переход от одноуровневой (специалитет) к двухуровневой (бакалавриат и магистратура), а затем и к трехуровневой (бакалавриат, магистратура и аспирантура) системам подготовки специалистов, а также внедрение новых образовательных и профессиональных стандартов, потребовали

существенного изменения образовательных программ. Так в рамках бакалавриата в институте оказалось нецелесообразным вести подготовку одновременно по двум близким направлениям «Машиностроение» и «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства». Переход к модульной структуре учебных планов, наряду с необходимостью обеспечить обучающимся возможность выбора индивидуальной траектории освоения образовательной программы, позволили разработать технологию, удовлетворяющую этим требованиям.

Сегодня институт предлагает для направления подготовки бакалавров «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства» три индивидуальных траектории освоения образовательной программы с различной профессиональной направленностью. Организация учебного процесса по такой программе основана на последовательном прохождении учебных дисциплин, объединенных в модули, позволяющие по накопительному принципу формировать определенную совокупность компетенций выпускников в конкретной предметной области профессиональной деятельности. Содержание модулей может варьироваться в зависимости от профильной направленности траектории обучения.

Возможность выбора индивидуальной траектории особенно необходима для обучающихся по очно-заочной и заочной формам, поскольку они уже имеют некоторые профессиональные квалификации и могут подходить к этому выбору более осознанно в силу имеющегося опыта и потребностей своей производственной деятельности. Для обучающихся по очной форме такая технология также оптимальна, поскольку позволяет корректировать выбор варианта дальнейшего освоения образовательной программы после прохождения начальных этапов производственной практики на предприятиях.

По согласованию с основным заказчиком (АО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод») в качестве основного вида профессиональной деятельности выпускников выбрана производственно-технологическая (прикладной бакалавриат), а в качестве дополнительных – проектно-конструкторская и организационно-управленческая.

Образовательная программа включает систему модулей, каждый из которых является логически завершенной самостоятельной учебной единицей, формирующей группу взаимосвязанных компетенций.

Имеются модули, обязательные для освоения всеми студентами: Мировоззренческие основы профессиональной деятельности, Основы

профессиональной коммуникации, Гуманитарная и социальная культура, Экономика предприятия, Научно-фундаментальные основы профессиональной деятельности, Информационные основы проектирования, Основы проектирования машин, Производственная и экологическая безопасность, Физическая культура и спорт, Технологические процессы в машиностроении, Проектирование производства, Технология металлов и конструкционные материалы, Основы инженерных знаний, Практики, Государственная итоговая аттестация.

Индивидуальные образовательные траектории обеспечиваются выбором двух из шести предложенных модулей по выбору студентов.

Например, образовательная траектория «Сварочные технологии в машиностроительном производстве» предусматривает освоение модулей Проектирование сварных конструкций в машиностроении и Проектирование технологических процессов сварки плавлением и давлением, включающих последовательно пять учебных дисциплин.

Выпускники бакалавриата, желающие подняться на более высокий образовательный и профессиональный уровень, могут продолжить обучение по программе магистратуры «Технология автоматизированного машиностроения», повышая тем самым свои ценность и привлекательность на рынке труда.

УДК 658.386.3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФОРМ РЕАЛИЗАЦИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ТРЕБОВАНИЙ СОВРЕМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

И. П. Стрельцова, канд. психол. наук, ir-strel@mail.ru

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил, Россия

Аннотация. Рассмотрены возможности, преимущества и порядок реализации дополнительных профессиональных программ повышения квалификации/ профессиональной переподготовки в форме стажировки для специалистов предприятий и педагогов профессионального образования.

Ключевые слова: дополнительные профессиональные программы, повышение квалификации, профессиональная переподготовка, стажировка.

Дополнительное профессиональное образование (ДПО) – актуальный в современных условиях вид образовательной деятельности, направленный на предоставление новых умений и навыков для различных групп трудовых ресурсов. В этом случае на сотрудников предприятий проецируется возможность получения новых знаний и умений с учетом профессиональных потребностей современного производства, а также требований руководителя и запросов рынка труда.

Дополнительное профессиональное образование, реализуемое в классической форме профессиональной переподготовки и повышения квалификации, проводится на основании профессиональных стандартов, которые необходимы работнику для выполнения определенной трудовой функции. Необходимо сказать о том, что для некоторых профессий действуют профессиональные стандарты, которые требуют прохождения дополнительного обучения по истечении четко определенного количества времени. Также ДПО позволяет получить новые знания по профессии с учетом инновационных разработок, которые сегодня постоянно внедряются на промышленных предприятиях.

Чаще всего необходимость в прохождении дополнительного обучения возникает:

- в случае, когда специалиста назначают на новую должность, которая предусматривает необходимость получения ряда дополнительных умений, навыков и знаний;
- в случае, если есть карьерный резерв, но специалист, которого планируют перевести на новую должность имеет смежную профессию;
- когда возникает необходимость внедрения инновационных методик, технологий, оборудования, но специалистов, которые могут с ними работать нет.

Программы ДПО максимально приближены к практике и предполагают освоение специальных профильных дисциплин, нацеленных на формирование необходимых профессиональных компетенций. Особенностью программ ДПО, в отличие от базового среднего профессионального и высшего образования, является значительное сокращение времени их освоения, что особенно важно для долгосрочных курсов профессиональной переподготовки, направленных на освоение нового вида профессиональной деятельности или приобретение новой квалификации. Профессиональная переподготовка является достойной альтернативой второго высшего образования.

Так опрос руководителей учреждений дополнительного профессионального образования показал (рис.1), что основным преимуществом программ ДПО перед традиционными программами высшего и среднего профессионального образования (67,6 % респондентов) является сокращение продолжительности обучения. На выбор слушателей также сильное влияние оказывают рекомендации работодателя – так считает 57 % респондентов. Половина ответов указывает на то, что документ о прохождении программы ДПО дает дополнительные преимущества при найме на работу и продвижении по карьерной лестнице. Следующим в рейтинге преимуществ программ ДПО оказался ценовой фактор, и в конце рейтинга – более низкие барьеры поступления на программы ДПО по сравнению с программами высшего и среднего профессионального образования.¹

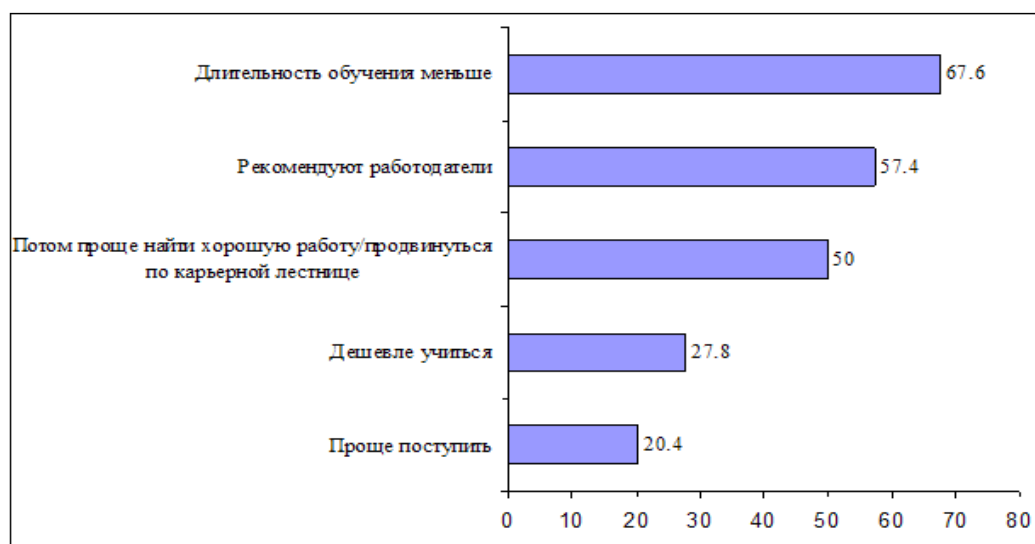


Рис.1. Преимущества программ ДПО перед программами ВО и СПО

Однако, высоко оценивая преимущества программ ДПО, нельзя обойти вниманием и возникающие затруднения при их реализации, особенно в части программ профессиональной переподготовки. Из опыта самыми существенными из них можно назвать:

- часто возникающие единичные потребности на предприятиях в специалисте определенного профиля, которые не позволяют сформировать полноценную группу для обучения;

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Мониторинг экономики образования. <https://memo.hse.ru/ind>.

•отсутствие необходимых практико-ориентированных компетенций у преподавателей вуза, особенно с учетом специфики технических задач предприятия-заказчика и его актуальных инноваций.

В настоящее время современное законодательство в области ДПО позволяет решить подобные образовательные проблемы путем применения стажировки как полноценной формы дополнительного профессионального образования. Так Федеральным законом от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации» (часть 12 статьи 76) [1] стажировка определена как форма реализации дополнительных профессиональных программ. Порядок организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным профессиональным программам в форме стажировки изложен в приказе Министерства образования и науки Российской Федерации от 1 июля 2013 г. №499 [2].

Стажировка осуществляется в целях изучения передового опыта, в том числе зарубежного, а также закрепления теоретических знаний, полученных при освоении программ профессиональной переподготовки или повышения квалификации, и приобретения практических навыков и умений для их эффективного использования при исполнении своих должностных обязанностей. Стажировка может носить индивидуальный или групповой характер и предусматривать такие виды деятельности, как:

- самостоятельная работа с учебными изданиями;
- приобретение профессиональных и организаторских навыков;
- изучение организации и технологии производства, работ;
- непосредственное участие в планировании работы организации;
- работа с технической, нормативной и другой документацией;
- выполнение функциональных обязанностей должностных лиц (в качестве временно исполняющего обязанности или дублера);
- участие в совещаниях, деловых встречах.

Содержание стажировки определяется образовательной организацией с учетом предложений организаций, направляющих специалистов на стажировку. В учебном плане дополнительной профессиональной программы должно быть указано, что программа реализуется полностью или частично в форме стажировки. Обучение в форме стажировки также завершается обязательной итоговой аттестацией. Конкретный перечень итоговых аттестационных испытаний устанавливается дополнительной профессиональной программой (вид итоговой аттестации может быть представлен в форме защиты отчета о стажировке).

Стажировка может проводиться как в Российской Федерации, так и за рубежом на базе предприятий, организаций, учреждений, в ведущих научно-исследовательских организациях, образовательных организациях, федеральных органах исполнительной власти и др., осуществляющих деятельность, соответствующую области и (или) объектам, и (или) видам профессиональной деятельности.

Продолжительность и сроки стажировки определяются образовательной организацией самостоятельно, исходя из целей обучения по дополнительной профессиональной программе. Сроки стажировки согласовываются с руководителем организации, где слушатель будет проходить стажировку.

При наличии в организации, где слушатель проходит стажировку, вакантных должностей слушатели могут зачисляться на них, если работа соответствует тематике дополнительной профессиональной программы и индивидуальному заданию на стажировку. Со слушателем – стажером может быть заключен срочный трудовой договор согласно статье 59 Трудового кодекса Российской Федерации [3].

Общую ответственность за организацию стажировки несет руководитель (ответственный, куратор, директор и др.) дополнительной профессиональной программы от образовательной организации. Руководитель стажировки разрабатывает тематику индивидуального задания на стажировку, оказывает методическую помощь обучающемуся при выполнении им задания и сборе материалов к отчету, оценивает результаты выполнения обучающимся индивидуального задания на стажировку.

Организация, где слушатель проходит стажировку, самостоятельно принимает решение о назначении ответственного (руководителя) за эту стажировку. В функции ответственного (руководителя) могут входить:

- обеспечение допуска слушателя в организацию;
- организация рабочего места слушателя;
- конкретизация индивидуального задания;
- выдача отдельных поручений и контроль исполнения;
- организация допуска к информации, необходимой для выполнения индивидуального задания;
- помощь по различным вопросам, связанным с выполнением индивидуального задания на стажировку;
- подготовка отзыва о прохождении стажировки слушателем.

С начала прохождения стажировки слушатель ведет сбор необходимого материала, который оформляется в соответствии с индивидуальным

заданием стажировки (дневник, журнал, схемы и т. д.). По завершению стажировки слушатель может получить письменный отзыв от ответственного (руководителя) стажировки от предприятия.

Лицам, успешно освоившим соответствующую дополнительную профессиональную программу, реализуемую полностью или частично в форме стажировки, и успешно прошедшим итоговую аттестацию, выдаются документы о квалификации: удостоверение о повышении квалификации и (или) диплом о профессиональной переподготовке. В документах о квалификации можно указывать данные о прохождении стажировки.

Стажировка на предприятии как форма ДПО для преподавателей вуза также может способствовать более эффективному решению задачи повышения квалификационного уровня преподавателя, связанного с освоением новых и специальных профессиональных компетенций в условиях требований современного производства.

Педагогические работники согласно статье 47 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» имеют право на дополнительное профессиональное образование по профилю педагогической деятельности не реже чем один раз в три года. К обязанностям педагогического работника в соответствии со статьей 48 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» относится систематическое повышение своего профессионального уровня.

Повышение профессионального уровня педагогического работника может осуществляться в различных формах (как, например, внутрифирменное обучение по программам ДПО, организуемое в своей образовательной организации или в других образовательных организациях, участие в конференциях, написание монографий и др.), большая часть из которых имеет общий профессиональный характер, довольно затратны по времени и часто такое обучение не может обеспечить запрос на получение знаний в области технических инноваций конкретного предприятия. Стажировка преподавателя на профильном предприятии как форма ДПО позволит более эффективно организовать условия для получения преподавателем необходимых практико-ориентированных профессиональных компетенций.

ДПО в форме стажировки в условиях возросших требований к квалификации сотрудников предприятий, необходимости быстрого освоения ими смежных профессий и новых профессиональных компетенций, даже при единичном запросе на обучение, может стать одним из наиболее

эффективных направлений в подготовке персонала предприятий при меньших финансовых затратах.

Вместе с тем такая форма ДПО позволит решить задачу повышения практического квалификационного уровня преподавателя, наполнения его компетентности специальными знаниями современных технологий профильного предприятия. Стажировка носит практико-ориентированный характер, и в дальнейшем результат стажировки может стать основой для актуализации рабочей программы дисциплины (модуля) или практики, дополнительной профессиональной программы, методического сопровождения к ним, разработки методик проведения занятий и т. д., в целом совершенствуя образовательный процесс в области дополнительных образовательных программ.

Литература

1. Федеральный закон от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации».
2. Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от 1 июля 2013 г. № 499 «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным профессиональным программам».
3. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30 декабря 2001 г. № 197-ФЗ.
4. Методика профессионального обучения / под общ. ред. В. И. Блинова. – М., 2017.

УДК 320.47:001.891.573:621.9.048

ПРОБЛЕМЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

Е. А. Дубровская, dubrovka63@list.ru

В. П. Плещев

УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Рассматривается стратегия вуза, направленная на раскрытие творческих способностей студентов; готовность вуза осуществлять инновационную деятельность. Как образовательная среда использует проектный метод, моделирующий метод и метод взаимодействия вуза и производства.

Ключевые слова: стратегия вуза, инновационное развитие, интеллектуальный потенциал студентов, интеллектуальный потенциал преподавателей, изобретательская деятельность, условия для саморазвития личности, управление технологиями, управление инновациями.

Одним из конкурентных преимуществ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ) является активная изобретательская деятельность – от задачи до изделия, и интенсивное взаимодействие с предприятиями России. В настоящее время эти связи развиваются путем заключения прямых договоров между заказчиками и УрФУ, где оговариваются необходимые требования к совокупности компетенций выпускников образовательных программ, направляемых на предприятие. Поэтому набор модулей, входящих в образовательные программы, варьируется согласно требованиям предприятий. Другим примером взаимодействия ВУЗ – ПРОИЗВОДСТВО могут служить полученные за 2016-2018 гг. более 100 патентов, статьи в журналах, индексируемых наукометрическими базами Scopus и Web of Science, в журналах ВАК и размещенные в РИНЦ.

Каждый сотрудник университета является неотъемлемой частью корпоративного интеллектуального потенциала. Систематичность действий администрации по развитию творческого потенциала работников создает условия и возможности приобретения организацией стратегических конкурентных преимуществ, как в настоящем, так и в будущем. Ключевую роль в этом направлении играет эффективность проведения инновационной деятельности, которая зависит от степени развития интеллектуального потенциала сотрудников. Примером такой деятельности могут служить продукты малых инновационных предприятий с участием УрФУ, представленные на рынке интеллектуальной собственности:

- «FoRest»: программное обеспечение для расчета кубатуры круглого леса. Производитель: ООО «Квинта».
- «Vision»: программно-аппаратный комплекс для контроля параметров работы плавильной печи. Производитель: ООО «Квинта».
- Оригинальные установки очистки воды до питьевых стандартов. Производитель: ООО «БМБ».
- Автоматизированная оптическая система гранулометрического анализа VISIZE. Производитель: ООО «Скэйлим».
- Устройства пожаротушения нового поколения ГИРС (ранцевые гидроимпульсные распылительные системы). Производитель: ООО «ТП ГИРС».

- Уникальный металлосплав для обработки контактов высоковольтных электрических соединений. Производитель: ООО «Энкон-сервис».
- Радиально-ковочная машина. Производитель: ООО «РадиалПро».
- Аналитический комплекс для мониторинга тяжелых металлов. Производитель: ООО «НПП Экобиотест».
- Лазерные измерительные устройства. Производитель: ООО «Научно-производственное предприятие «Микрон».
- Портативная радиометрическая система. Производитель: ООО «Стагирит МедИн» и др.

Инновационная инфраструктура УрФУ является инициатором и участником целого ряда инфраструктурных проектов, которые содействуют развитию инноваций в Уральском регионе и значимы в федеральном масштабе. Как правило, в деятельности коммерческих организаций благоприятные периоды сменяются стагнацией, однако общество все время находится в поступательном движении, что обеспечивается за счет того же интеллектуального потенциала организаций. Его правильное использование является одной из форм адаптации к постоянно меняющимся условиям рынка и социализации молодых специалистов и выпускников.

УрФУ, как и другие вузы Российской Федерации, одним из приоритетных направлений своего развития считает непрерывное освоение новых технологий и постоянное поддержание на высоком уровне доли интеллектуального капитала в суммарном показателе капитализации. Его научно-педагогический персонал, сотрудники и студенты являются одним из главных факторов увеличения конкурентоспособности вуза. Успех стратегии развития университета во многом определяется наличием серьезной экономической и технологической базы, а также и соответствующего интеллектуального потенциала. Вуз активно коммерциализирует результаты своей интеллектуальной деятельности. В 2018 г. увеличилось число заключенных договоров по трансферу технической документации и технологий, в результате чего существенно возросла прибыль от реализации результатов интеллектуальной деятельности.

Вуз – это свой мир, традиции обучения, качество выпускаемых специалистов. Большинство руководителей заводов и малых предприятий уральского региона – выпускники УГТУ-УПИ. В университете были и будут высокие требования к качеству выпускников, а значит и к научно-педагогическим работникам. Особую значимость приобретает

внутривузовская система подготовки персонала. Обучение сотрудников ведется постоянно. Что касается студентов, то трехуровневая система обучения: бакалавр – магистр – аспирант является эффективной для выявления творческой молодежи. На первых ступенях идет подготовка исполнителей, в аспирантуру отбираются исследователи-новаторы.

В УрФУ активно ведется обучение студентов и сотрудников основам патентного дела. Полученные знания и умения мотивируют на творчество, достижение результата, повышают инициативность. На сегодняшний день важно видеть, направлять и обучать тех, кто в наибольшей степени способен выдвигать новые идеи и работать в новых условиях. Для работника наукоемкого производства необходимы не просто знания в области фундаментальной или прикладной науки, сотрудник должен обладать определенными характеристиками: кругозор, понимание процессов, профессиональная направленность, способность к самообразованию и самореализации.

В качестве площадок для творческого общения и мотивации к работе в команде служат стартапы. Например, Акселератор УрФУ – профессиональная программа для технологических стартапов и разработчиков по ускорению развития инновационных проектов, проводится инновационной инфраструктурой Уральского федерального университета с 2014 г. Программа позволяет основателям и разработчикам инновационных проектов определиться с характеристиками результатов интеллектуальной деятельности, найти стратегических партнеров для развития проекта, привлечь финансирование, найти новые рынки и увеличить продажи компании.

Сотрудничество с крупными предприятиями Среднего Урала позволяет специалистам УрФУ не отрываться от современной реальности, быть в курсе актуальных производственных задач. Так, в прошлом году, совместно со специалистами предприятия, разработана патентная стратегия для АО «Научно-производственная корпорация «Уралвагонзавод» на 2019-2023 гг. В настоящее время начинается ее реализации на предприятиях, входящих в корпорацию. По мнению заместителя генерального директора корпорации Романа Васяна необходимость принятия патентной стратегии обусловлена все более активным использованием интеллектуальных прав в конкурентной борьбе на российском и зарубежных технологических рынках. Патентная стратегия Уралвагонзавода – это системный документ, определяющий ключевые продукты и технологии предприятия, модели конкурентного

поведения на рынке, принципы принятия решений, способы и территории правовой охраны, а также показатели эффективности и программу реализации стратегии. Реализация патентной стратегии позволит не только усилить конкурентные преимущества продукции предприятия, но и будет способствовать мотивации инновационной деятельности всех подразделений корпорации.

Разработка патентной стратегии потребовала глубоких и системных исследований инновационной деятельности предприятия и его конкурентной среды, что позволило выявить сильные и слабые стороны, выработать системные решения по компенсации рисков и развитию ключевых конкурентных преимуществ. Одновременно с разработкой стратегии группа из 22 специалистов и руководителей корпорации прошла в УрФУ обучение по программе профессиональной переподготовки. Ключевые вопросы стратегии активно обсуждались в рамках этой образовательной программы.

Таким образом, управление технологиями и инновациями является социальным процессом, а развитие интеллектуального потенциала должно опираться на развитие личности каждого отдельного работника. Любое нововведение уникально и является результатом как индивидуального, так и коллективного творческого труда. Научно-исследовательский персонал выступает как генератор идей, является исходным импульсом появления инноваций. Творческие способности сотрудников нуждаются в стимулировании и развитии. Стоит обратить внимание, что материальные стимулы необходимы, но также важны и нематериальные аспекты: развитие себя как личности, желание оставить след на земле. В. В. Давыдов считает, что основные этапы становления личности неотделимы от развития ее творческих возможностей, а «личностью является человек, обладающий определенным творческим потенциалом» [1].

Современное общество предъявляет заказ на творческую активность личности, ориентированной на знания и использование новых технологий в профессиональной деятельности; на специалиста, обладающего творческим мышлением, высоким уровнем развития интеллекта, высокой работоспособностью, общей воспитанностью, способностью свободно ориентироваться в изменяющихся условиях окружающего мира. И. С. Якиманская рассматривает творческую активность как системообразующее качество личности. Она утверждает, что принцип активности личности – основополагающий принцип обучения и воспитания. Любая человеческая активность связана с индивидуальными целями и намерениями,

потребностями человека, его эмоционально избирательным отношением к действительности [2].

На современном этапе перед образованием стоит задача создания условий для самореализации и саморазвития личности, проявления готовности к развитию собственного творческого потенциала на знаниевом, мотивационном, процессуальном, эмоционально-волевом и рефлексивном уровнях. Университет, как образовательная среда, способен активизировать творческий потенциал студентов на основе реализации целей, задач и принципов педагогики, которые включают проектное обучение, научно-исследовательскую работу. Содержание всех видов формирования творческой активности должно культивировать единство творческой профессиональной индивидуальности на основе использования как традиционных, так и инновационных образовательных технологий [3].

Литература

1. Давыдов В. В. Проблемы развивающего обучения. – М., 1986.
2. Якиманская И. С. Принцип активности в педагогической психологии // Вопросы психологии. – 1989. – № 6. – С. 5-13.
3. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Официальный сайт. – Режим доступа: <http://urfu.ru/ru/> (дата обращения: 22.01.2019).

УДК 620.18:621.791,533, 534

НОВЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

С. В. Анахов¹, канд. физ.-мат. наук, sergej.anahov@rsvpu.ruА. В. Матушкин², канд. техн. наук, 227433@yandex.ru¹РГППУ, г. Екатеринбург, Россия¹ООО «Техноплазма», г. Екатеринбург, Россия²УрФУ, г. Екатеринбург, Россия²ООО НПО «Полигон», г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Показаны и проанализированы конструктивные способы повышения эффективности газодинамической стабилизации в новых отечественных плазматронах для резки металлов. Предложены критерии и способы оценки эффективности, основанные на равномерности распределения скоростей плазмообразующего газового потока по сечению газоздушного тракта плазматрона. Намечены направления дальнейших исследований в сфере проектирования плазматронов подобного типа.

Ключевые слова: плазматрон, проектирование, плазмообразующий газ, скорость, газодушный тракт, газодинамическая стабилизация, завихритель, расширительная камера.

Сравнение параметров плазморезательных импортных и отечественных технологий приводит к выводу, что российская продукция имеет в большинстве случаев худшие показатели – по материалу- и энергопотреблению, параметрам качества, степени автоматизации и простоте управления и даже дизайну установок. Это связано с малым количеством исследований и новых разработок, позволяющих повышать эффективность, качество и безопасность электроплазменных технологий резки металлов.

Основным фактором, определяющим высокие показатели эффективности (в первую очередь, точности и производительности реза), является работа системы газодинамической стабилизации плазматрона, обеспечивающей надежность работы катодного и соплового узлов плазматрона, высокую степень тепловложения, кинетические свойства и устойчивость горения плазменной дуги [1]. Проведенные авторами исследования показали [2], что асимметрия подачи газа в расширительную камеру плазматрона перед завихрителем и ограниченные размеры этой камеры являются причиной того, что широко применяемый способ газодинамической стабилизации (ГВС) с применением однопоточной схемы подачи плазмообразующего газа (ПОГ) и одной вихревой камеры не обеспечивает равномерность распределения газового потока по каналам завихрителя и сечению газоздушного тракта (ГВТ). Для повышения равномерности распределения скоростей потока ПОГ авторами было

предложено несколько конструктивных решений. Одно из них было реализовано в плазмотроне ПМВР-2М (ООО НПО «Полигон») за счет применения системы газодинамических фильтров (дополнительных сплошной и перфорированных стенок в расширительной камере) [3], а также оптимизированных по газодинамическим критериям геометрии расширительной камеры и завихрителя. Однако есть и другие возможности конструктивного улучшения системы газовихревой стабилизации металлорежущих плазмотронов. Таким эффективным решением стала разработка конструкции ГВТ с симметричной подачей ПОГ в расширительную камеру и двумя завихрителями и расширительными камерами (рис.1). Подобный метод выравнивания скоростей может быть применен в плазмотронах как с двух-, так и с однопоточной схемой организации течения ПОГ. В первом случае рассматриваемая технология ГВС предполагает использование в формирующей струе канале плазмотрона, работающего по принципу двойного сопла и в отечественном исполнении получившего название «узкоструйной плазмы» (серия ПМВР-5, ООО НПО «Полигон»). Во втором варианте она может быть использована в качестве дополнительной меры повышения эффективности ГВС в традиционных плазмотронах в целях обеспечения прецизионного качества резки металлов.

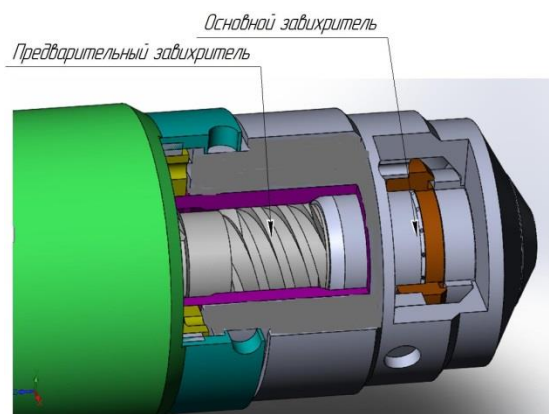


Рис. 1. Конструктивная схема плазмотрона ПМВР-3М с двумя завихрителями в системе газовихревой стабилизации

Повышение коэффициента равномерности распределения потока ПОГ в данной конструкции плазмотрона происходит следующим образом. На участке ввода газа происходит равномерное разделение потока на 2 центральносимметрично расположенных цилиндрических канала, обеспечивающих последующий симметричный ввод ПОГ в зону подготовки и выравнивания потока ПОГ перед входом в сопловой узел. Данная часть

ГВТ включает в себя расширительную камеру смешения потоков (КС), предварительный (формирующий) завихритель (ФЗ), 2-ю расширительную камеру и 2-й стабилизирующий завихритель (СЗ). Сопловой узел выполнен с использованием стандартных серийно выпускаемых пар сопла и катода. Для предварительного выравнивания потока ПОГ предложено использовать формирующий завихритель (ФЗ) с 4 каналами ввода газа, расположенный на расстоянии 4-5 калибров (13-16 мм) от точки ввода ПОГ в камеру смешения. Данный завихритель является предварительным и предназначен для придания потоку ПОГ направления совпадающего с направлением закрутки основного завихрителя. Расположение ФЗ выбрано в соответствии с проведенными ранее оценками для плазмотрона ПМВР-2М [4] с системой газодинамических фильтров.

Оценка равномерности распределения динамических характеристик газового потока может быть проведена двумя способами, в зависимости от аппаратных возможностей применяемого программного комплекса (например, SolidWorks FlowSimulation) и требуемой точности вычислений. При ограниченных ресурсах расчет скоростей потока ПОГ можно провести в 4-х симметричных точках в выбранном сечении плазмотрона, причем одна из точек выбирается напротив точки ввода газа в расширительную камеру. В качестве критерия степени неравномерности по сечению ГВТ плазмотрона в этом случае можно использовать коэффициент отношения скоростей [2], не учитывающий, однако, погрешности, обусловленные вероятностью пропустить максимальные и минимальные отклонения от средних значений скорости в данном сечении при ее вероятном неравномерном распределении. Поэтому, более объективной представляется оценка неравномерности, сделанная расчетным путем по всему заданному периметру контрольной плоскости. При этом, однако, возникает проблема выбора критерия оценки неравномерности газового потока.

В целях поиска критерия оценки степени равномерности распределения потока при анализе большого числа контрольных точек статистическими методами были проанализированы полученные распределения скоростей V для различных плазмотронов [5]. При обработке данных распределений в качестве критериев были рассмотрены часто употребляемые при обработке больших массивов случайных величин параметры;

1. Размах вариации $R = V_{max} - V_{min}$
2. Отношение вариации $L = V_{max}/V_{min}$,
3. Среднее линейное отклонение (СЛО): $a = \sum_{i=1}^n |V_i - \bar{V}|/n$,

4. Среднее квадратическое отклонение (СКО): $S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2 / n}$,

5. Коэффициент вариации $F = S / \bar{V}$.

Анализ результатов статистической обработки распределений скорости в контрольных сечениях плазмотронов показал статистически значимое для всех представленных для анализа параметров (R , L , a , S и F) увеличение эффективности газовихревой стабилизации (равномерности распределения скорости), достигнутой в модернизированных плазмотронах ПМВР-2М, ПМВР-3М и ПМВР-5.3 по сравнению с базовым плазмотроном ПМВР-М. В качестве единственного критерия эффективности ГВС был выбран коэффициент вариации F , дающий выраженное в процентах отношение СКО (дисперсии) скорости к ее среднему значению в анализируемой выборке, и легко вычисляемый, например в Excel, где имеется встроенная функция расчета СКО.

С учетом упомянутых критериев был рассмотрен вопрос оптимизации системы газовихревой стабилизации плазмотрона ПМВР-3М, основанной на применении 2-х завихрителей в канале формирования потока ПОГ, с точки зрения взаимного расположения предварительного (формирующего) и основного (стабилизирующего) завихрителей. Как показали расчеты, степень неравномерности распределения скоростей газа по сечению камеры смешения снижается от 5-6 кратной (в плоскости близкой к точкам ввода газа в камеру смешения) до 1,3-1,5 в плоскости ввода газа в формирующий завихритель. Результаты расчетов, также свидетельствуют, что использование двух центральносимметричных входных отверстий приводит к значительному выравниванию потока ПОГ после выхода из предварительного (формирующего) завихрителя (ФЗ), по сравнению со схемой с асимметричной подачей газа по одному каналу (например, для плазмотрона ПМВР-М [2]). Небольшие (в 3-6 раз) соотношения площадей проходных сечений камеры смешения, каналов ввода в нее газа и формирующего завихрителя обеспечивают незначительность газодинамических сопротивлений и потерь давления в зонах сопряжения камеры смешения с соседними участками ГВТ. При прохождении газом каналов ФЗ за счет достаточно большой их поперечной площади также обеспечивается минимум вязких потерь давления в потоке газа при сохранении небольших (20-25 %) различий в скоростях протекания газа по каналам завихрителя, вызванных неравномерностью ввода газа в камеру смешения. Подобная степень неравномерности наблюдается и на выходе из

каналов ФЗ, из-за чего для увеличения равномерности распределения используется 2-й участок расширения, выполненный также, как и 1-й (камера смешения), в форме кольцевой камеры.

Для подтверждения эффективности выравнивания скоростей, а также для определения положения 2-го (стабилизирующего) завихрителя выполнен расчет скоростей потока ПОГ по сечению кольцевого канала 2-й расширительной камеры на расстояниях 8, 11, 14, 17, 20 после выхода из ФЗ (расчетная схема – на рисунке 2). В качестве сечения выбрана окружность с диаметром в 14,5 мм, равным средней линии кольцевого сечения 2-й расширительной камеры после завихрителя. Результаты расчетов пульсаций скоростей в контрольных кольцевых сечениях приведены на рис. 3 (по горизонтальной оси откладывается длина, отсчитываемая по окружности выбранного контрольного сечения) и в табл. 1. Представленные на рис. 3 и в табл. 1 данные позволяют определить оптимальное расположение основного (стабилизирующего) завихрителя на расстоянии 10-12 мм от предварительного (формирующего) завихрителя.

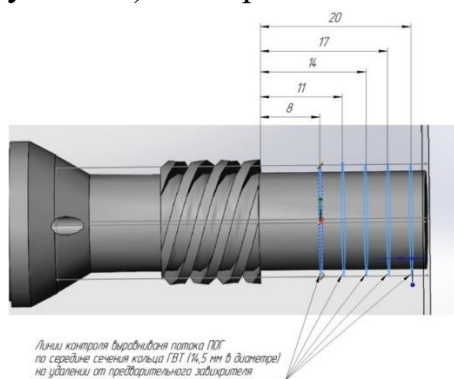


Рис. 2 Схема расчета скоростей в контрольных сечениях 2-й расширительной камеры



Рис. 3 Изменение скорости в контрольных сечениях 2-й расширительной камеры

Табл. 1. Скорости потока ПОГ (V_{max} и V_{min}) и неравномерность их распределения (%) в контрольных сечениях 2-й расширительной камеры

Скорость, м/с	Расстояния от завихрителя				
	8	11	14	17	20
V_{max}	320	300	294	283	268
V_{min}	262	273	263	256	248
%	18	9	10	9	7.5

Анализ эффективности ГВС на основе выбранного ранее критерия F свидетельствует о повышении эффективности ГВС в 1,5-2 раза на «холодном» газе (без нагрева плазменной дугой) и в 2-3 раза при нагреве плазменной дугой в новых плазмотронах (ПМВР-2М, ПМВР-3М и ПМВР-5) по сравнению с базовым (ПМВР-М). Расчеты показали также влияние температуры плазменной дуги на равномерность распределения потока ПОГ. У плазмотронов ПМВР-М и ПМВР-2М наблюдается увеличение коэффициента вариации примерно в 10 раз, а у ПМВР-5.3 – в 5 раз, что также свидетельствует о конструктивных преимуществах предложенной системы газовихревой стабилизации дуги для плазмотронов, работающих по технологии «узкоструйной» плазмы.

Анализ новых конструктивных способов выравнивания потока ПОГ по сечению ГВТ плазмотронов для высокоточной резки металлов свидетельствует об эффективности применения в них модернизированных газовихревых систем. В целях дальнейшего повышения эффективности их работы целесообразно:

- ✓ провести оптимизацию конструкции стабилизирующего завихрителя в плазмотроне ПМВР-3М, использующем способ подачи газа по двум центрально симметричным каналам с последующим применением двух однонаправленных вихревых камер, формирующих поток ПОГ перед входом в сопловой узел,
- ✓ исследовать конструктивные особенности вторичного контура подачи газа в двух-поточных плазмотронах, работающих по технологии узкоструйной плазмы (серия ПМВР-5).

Литература

1. Анахов С. В. Принципы и методы проектирования плазмотронов. – Екатеринбург : Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та. – 2018. – 165 с.
2. Анахов С. В. Исследование систем газовихревой стабилизации плазмотронов / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, А. В. Матушкин // Сварочное производство. – 2015. – № 4. – С. 20-24.

3. Патент на изобретение «Плазмотрон» № 2584367 от 11.03.2015 / Ю. А. Пыкин, С. В. Анахов, А. В. Матушкин. – Оpubл. 20.05.2016.
4. Анахов С. В. Газовихревая стабилизация в плазмотронах: новые решения / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, А. В. Матушкин // Сварочное производство. – 2015. – № 5. – С. 49-53.
5. Анахов С. В. Температурные корреляции параметров газовихревой стабилизации металлорежущих плазмотронов / С. В. Анахов, Ю. А. Пыкин, А. В. Матушкин // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2018. – Том 20, № 3. – С. 29-37.

**Работа выполнена в рамках НИР по государственному заданию Минобрнауки РФ №13.10317.2018/11.12*

Код УДК 621.791.725

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕР ГИБРИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Р. Р. Гараев, treeteey@yandex.ru

С. В. Курынцев, канд. экон. наук, kuryntsev16@mail.ru

КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, г. Казань, Россия

***Аннотация.** Рассмотрены особенности производства металл-полимер гибридных соединений с помощью лазерной обработки. Указаны типичные дефекты и причины их возникновения. Предложены области использования таких материалов.*

***Ключевые слова:** лазерная обработка, металл-полимер гибридное соединение, покрытие.*

Необходимость использования легких конструкций в автомобильной и авиационной индустрии постоянно растет. Использование многосоставных материалов может уменьшить вес изделия благодаря увеличению функциональной плотности, усталостных характеристик, жесткости или прочности. Эти цели могут быть достигнуты использованием гибридных соединений металла с пластиком. Пластмассы могут быть использованы из-за легкого веса, высокой коррозионной стойкости и отличной деформируемости, им можно придать разную форму и увеличить жесткость с помощью армирования. Металлы обычно используются для получения высокой прочности или определенных физических свойств, таких как

высокая тепловая или электрическая проводимости. И все же способ соединения играет решающую роль в применении таких материалов. Использование дополнительных материалов, таких как клеи, может повлиять на старение материала и время отверждения. Соединительные элементы, такие как заклепки и винты, являются концентраторами напряжений. Прямое соединение позволяет избежать этих недостатков и создать прочное взаимодействие между металлом и термопластиком. При прямом соединении термопластику нужно сообщить достаточную энергию, чтобы расплавить его. В расплавленном состоянии термопластик смачивает металл и проникает в его поверхность [1].

Группа немецких ученых разработала новый способ увеличения прочности склейки алюминия и пластика в гибридных материалах. Для создания прочных контактов ученые предложили обрабатывать поверхность металла инфракрасным лазером, после чего с помощью технологии литья пластмасс под давлением присоединять к нему полимерный материал. Новый метод позволяет получать прочные контакты, сохраняя при этом механические свойства полимерного материала [2].

Авторами [3] Робертом Шмиттом, Гильерме Маллманном и их коллегами был предложен метод лазерной обработки, при которой луч лазера фокусируется на поверхности металла, и тепловая энергия проходит через металл к зоне соединения. Этот способ обработки позволяет применять в данной операции армированные волокном пластики и непрозрачные полимеры и уменьшает термическую нагрузку на полимерный компонент. Также возможна сварка, при которой луч лазера проходит через полимер на границу соединения. Минусом данного способа является то, что полимер испытывает высокую термическую нагрузку и может быть использован только прозрачный полимер для данной длины волны излучения.

Перед соединением компонентов в металле необходимо создать бороздки лазером, в которые будет проникать расплавленный полимер. Так повышается сдвиговая прочность соединения.

Использование лазера хорошо тем, что можно менять форму и размеры луча в зависимости от требований опыта, можно управлять характером движения лазерного луча, его траекторией, интенсивностью.

Одним из факторов, влияющих на качество соединения, является скорость перемещения луча лазера. При малых скоростях происходит термическая деградация полимера, а при высоких скоростях не происходит

достаточного оплавления полимера и соответственно смачивания поверхности металла [3].

При термическом разложении полимера его продукты в виде газа и/или паров могут привести к появлению пузырей, образующихся в зоне соединения и уменьшающих прочность соединения. Размер пузырьков значительно уменьшается от крупных до небольших за счет увеличения скорости перемещения лазера. При меньшей тепловой нагрузке на полимер уменьшается скорость разложения и соответственно размеры и количество пузырьков [1].

При низкой скорости соединения пузырьки расположены глубже в полимере относительно пограничного слоя между полимером и металлом из-за более высокой текучести пластика под действием приложенного тепла. При более высоких скоростях соединения глубина расположения уменьшается за счет ограниченной текучести пластика [1].

Еще одним дефектом может являться область соединения, в которой не произошло смачивание металла полимером. Это случается из-за того, что к полимеру было подведено недостаточное количество теплоты, чтобы его расплавить. В таком месте будет находиться дефект соединения, и прочность этой области соединения будет мала.

Для исследования дефектов, описанных выше, группой немецких ученых [1] был предложен метод исследования структуры соединений металл-полимер гибридов, основанный на оптической когерентной спектроскопии [1]. Данным методом могут быть исследованы дефекты в реальном времени непосредственно во время самой операции соединения.

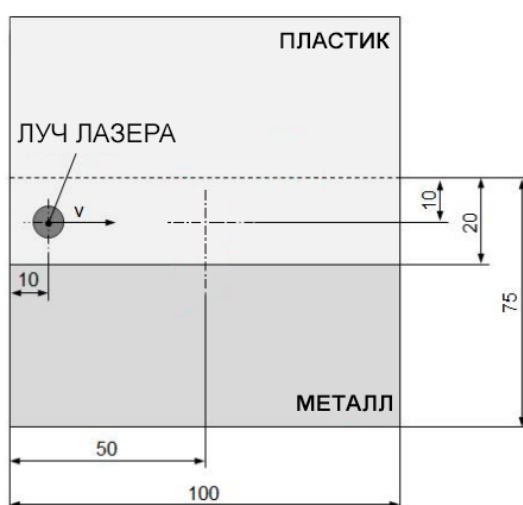


Рис. 1. Схематичное изображение траектории движения луча лазера

Также полимер может использоваться как защитное покрытие деталей, подвергающихся трению или коррозии. Функциями такого покрытия являются:

1. Повышение коррозионной стойкости к агрессивным средам;
2. Исключение фреттинг-коррозии;
3. Повышение герметичности и уплотнительных свойств;
4. Гашение вибрационных колебаний;
5. Выполнение роли твердой смазки в трущихся деталях;
6. Декоративные функции и др. [4].

Выводы

Данный вид гибридных материалов может быть широко использован в авиапромышленности, из-за меньшей массы деталей. Но при этом металл-полимер гибридные соединения обладают значительно меньшими механическими характеристиками, в сравнении с деталями, изготовленными из чистых сплавов.

Для получения необходимых свойств соединения необходимо проводить множество испытаний с подбором условий проведения опыта, т. к. это только развивающееся направление в материаловедении.

Лазерная обработка металлического компонента необходима для улучшения сцепления разнородных материалов.

Литература

1. 3D weld seam characterization based on optical coherence tomography for laser-based thermal joining of thermoplastics to metals / Robert Schmitt, Guilherme Mallmann, Philippe Ackermann [et al.] // Lasers in Manufacturing Conference 2015.
2. Дубов А. Лазер помог прочнее склеить пластик и алюминий / Александр Дубов // N+1. – Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2018/08/30/aluminum-plastic-hybrids> (дата обращения: 15.12.2018).
3. Schricker Klaus Adjustment and Impact of the Thermoplastic Microstructure of the Melting Layer in Laser-based Joining of Polymers to Metals / Klaus Schricker, Martin Stambke, Jean Pierre Bergmann // Lasers in Manufacturing Conference 2015.
4. Лазерные технологии упрочнения и нанесения защитных уплотнительных полимерных покрытий на резьбы насосно-компрессорных труб // RULA.SU. – Режим доступа: <http://rula.su/articles/lazernaya-obrabotka/lazernye-tekhnologii-uprochneniya-i-naneseniya-zashchitnykh-uplotnitelnykh-polimernykh-pokrytiy-na-r> (дата обращения: 15.12.2018).

УДК 621.791

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАВЛЕНИЯ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ С НАЛОЖЕНИЕМ ИМПУЛЬСОВ И С ЕСТЕСТВЕННЫМИ КОРОТКИМИ ЗАМЫКАНИЯМИ

А. Ю. Давыдов, a.iu.davydov@at.urfu.ruЮ. С. Давыдов, канд. техн. наук, yu.s.davydov@urfu.ru

УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Приведены результаты исследований процесса импульсно-дуговой наплавки порошковой высокохромистой проволокой. Показано, что при импульсном управлении дугой возможно повышение основных показателей процесса до величин, свойственных сплошной проволоке. Показано различие характера плавления порошковой и сплошной проволоки.

Ключевые слова: импульсно-дуговая сварка, порошковая проволока, осциллографирование.

Введение

При импульсно-дуговой сварке (ИДС) осуществляется регулируемое введение энергии в процессе образования и переноса капель металла. Импульсно-дуговой процесс получают за счет наложения на дугу импульсов напряжения и тока с заданной частотой и формой, что дает возможность управлять плавлением и переносом капель электродного металла. Снижаются тепловложение в основной металл и разбрызгивание электродного металла. При этом улучшается формирование шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Эти особенности приводят к повышению характеристик сварных соединений из сталей различных классов и назначений, отличающихся характером фазовых и структурных превращений, в частности, коррозионностойких аустенитных и высокопрочных мартенситных. За счет более интенсивного расплавления проволоки и меньших потерь заметно увеличивается производительность процесса [1, 2].

Применение порошковых проволок дает свои преимущества: возможность получения наплавленного металла с особыми свойствами; повышение производительности; минимизация чувствительности качества проплавления и формирования шва к непредусмотренному изменению настроек режима сварки; снижение затрат на исправление дефектов [3,4].

Однако имеются и специфические проблемы. Порошковые проволоки отличаются неравномерностью свойств по сечению, у шихты электро- и

теплопроводность значительно ниже, чем у оболочки. Активное пятно дуги локализовано на оболочке, а нагрев шихты происходит путем теплопередачи от оболочки, что меняет форму дуги, характер тепловых и физико-химических процессов на торце электрода, а также приводит к другим условиям горения дуги и образования капель, чем при сплошной проволоке [5].

Для сварки легированных сталей применяют проволоки с высоким содержанием хрома (12-27 %). Наличие компонента с высокой температурой плавления создает дополнительные сложности в отработке технологии, которые связаны со снижением стабильности и равномерности плавления порошковой проволоки.

Целью исследования является анализ влияния импульсно-дугового процесса на характеристики процесса плавления высокохромистых порошковых проволок.

Методика и материалы

Для изучения использовали порошковую проволоку типа 65X18 диаметром 1,2 с оболочкой из стали 0X17 и коэффициентом заполнения 16 %.

Характеристики плавления оценивали по следующим параметрам:

- 1) производительность (количество наплавленного металла за единицу времени) (Q), кг/ч;
- 2) коэффициент наплавки (α_n), г/(А·ч);
- 3) коэффициент потерь электродного металла, (ψ_{nom}), %.

При наплавке использовали режимы: безимпульсный Standart (S), импульсный Pulse (P) и импульсный SpeedPulse (SP) с модифицированным импульсом; сварочный аппарат (полуавтомат) Шторм-Lorch S5 SpeedPulse.

Скорость 12-24 м/час, горелку устанавливали перпендикулярно пластине. Для наплавки применяли защитную газовую смесь К-18 (82 % Ar + 18 % CO₂), расход 15-18 л/мин.

Диапазоны параметров приведены в табл. 1. Для каждого режима выполнено по пять наплавов на пластины толщиной 12 мм из стали СтЗсп.

Табл. 1. Диапазоны использованных значений параметров сварки

Режим	S	P	SP
Ток, А	155-205	160-210	155-230
Напряжение, В	25-26	32-38	32-38
Вылет электрода, мм	20-25	27-32	27-32

Для оценки процессов в дуге выполняли осциллографирование тока и напряжения дуги с помощью регистратора параметров сварки АWR-224М.

Результаты исследований

Результаты наплавки показали значительное отличие от известных для наплавки сплошной проволокой. Вид наплавленных валиков показан на рис. 1. Без импульсов (S), практически при любых сочетаниях тока и напряжения валики неравномерные, узкие (шириной до 10 мм), имеют сильные наплывы и подвороты по краям. В некоторых валиках видны поры, выходящие на поверхность, и зашлаковки. На поверхности пластины и валиков имеется множество брызг размером до 4 мм. На импульсном режиме (P) ширина полученных валиков от 10 до 14 мм. Валики относительно равномерные, нет наплывов, подрезов. Поверхность ровная, на некоторых валиках заметна неярко выраженная чешуйчатость, пор или зашлаковок на поверхности не видно. Имеются брызги, в основном величиной 0,5-1 мм. На импульсном режиме (SP) ширина полученных валиков от 12 до 16 мм, улучшается формирование шва. Валики равномерные, без наплывов. Поверхность ровная, отсутствуют поры и другие несплошности. Нет вплавленных крупных капель и частиц шлака. Имеется небольшое количество мелких брызг, размером до 0,5 мм.

В импульсном режиме при визуальном наблюдении обнаруживается периодическое образование более крупных капель. Перенос мелких капель визуально не фиксируется, но они присутствуют, о чем можно судить по виду брызг – в основном мелкие, диаметром до 0,5 мм и небольшое количество более крупных. Вероятно, имеется различие и в характере переноса металла.



а

б



В

Рис. 1. Вид наплавленных валиков: а - S1,2; б - P1,2; в - SP1,2

Результаты измерений параметров процесса плавления порошковых проволок приведены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты измерений параметров процесса плавления

Режим,	S	P	SP	S	P	SP
	Верхний диапазон токов			Нижний диапазон токов		
V _{пп} , м/с	0,17	0,19	0,23	0,10	0,13	0,17
Ток, А	205	210	225	155	160	160
Q, кг/ч	3,9	4,1	6,0	2,5	3,3	4,2
αн, г/А·ч	18,9	19,7	26,5	17,2	20,8	26,2
ψ _{пот} , %	14,0	8,2	5,3	7,6	7,4	6,9

При импульсно-дуговой сварке определенной скорости подачи проволоки соответствует меньшее усредненное значение тока. При одинаковой скорости подачи проволоки в режиме SP величина тока меньше, чем в режимах P, S. Это позволяет при постоянной производительности наплавки уменьшить тепловложение в основной металл.

Анализ показателей процесса плавления показывает следующее (рис. 2):

1) при близких значениях тока производительность наплавки в импульсных режимах выше: в SP – режиме в 1,60-1,80 раза по сравнению с безимпульсными;

2) значение коэффициента наплавки при использовании импульсного режима (SP) выше на 30-35 %;

3) потери (угар, разбрызгивание) снижены в 1,5-2 раза в сравнении с безимпульсным режимом (S) при обеспечении лучшего формирования валика;

4) Все показатели процесса плавления порошковой проволоки в SP-режиме соизмеримы со сплошной проволокой (в стандартном режиме) при их одинаковом диаметре.

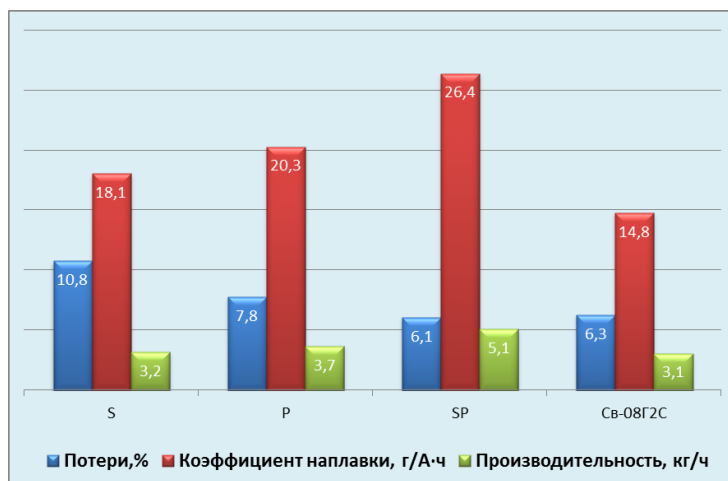


Рис. 2. Усредненные показатели процесса плавления проволоки

По осциллограмме стандартного режима (рис. 3) видно, что процесс представляет череду хаотических коротких замыканий, что объясняет высокое разбрызгивание. На осциллограмме режима SP (рис. 4) видны относительно редкие периодические короткие замыкания, видимо, соответствующие переносу более крупных капель. Характерная ступенька на заднем фронте импульса (рис. 4б) служит для активации дополнительной стадии мелкокапельного переноса после отрыва основной капли.

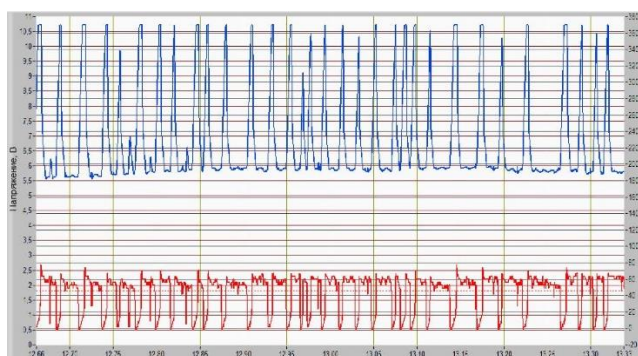


Рис. 3. Осциллограмма процесса сварки с естественными короткими замыканиями (режим Standart)

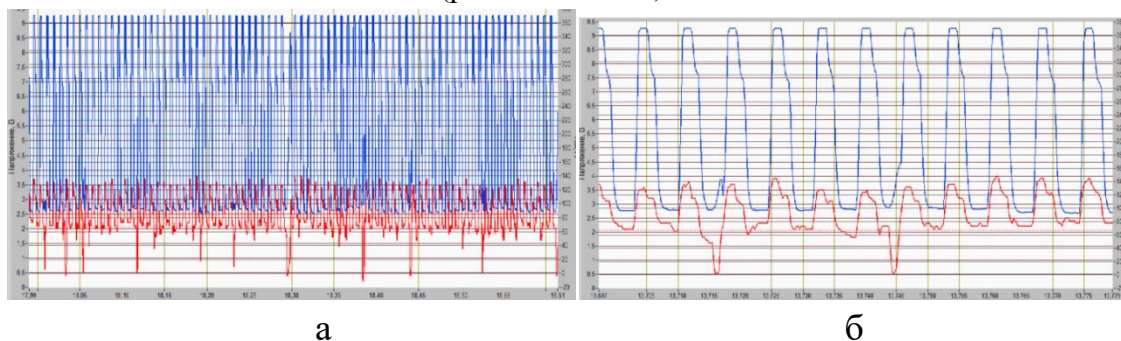


Рис. 4. Осциллограмма процесса импульсно-дуговой сварки (режим SpeedPulse) с модифицированным импульсом

Меньшая частота появления крупных капель, вероятно, отражает различные механизмы плавления оболочки и шихты при сварке порошковой проволокой.

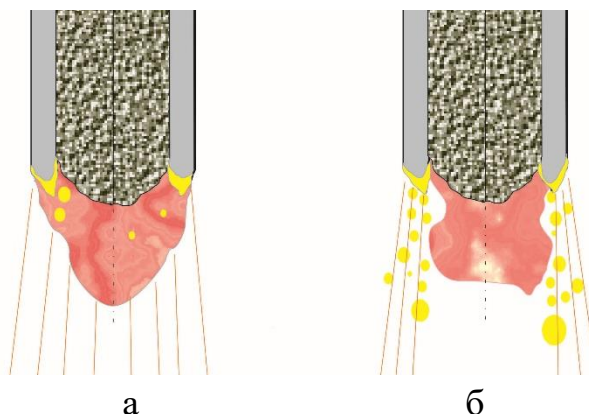


Рис. 5. Плавление порошковой проволоки при сварке с естественными короткими замыканиями (а) и при модифицированном импульсе (б)

Образование серии мелких капель без короткого замыкания обусловлено плавлением металлической оболочки за счет тепла активного пятна и столба дуги. Периодическое появление крупных капель соответствует постепенному плавлению шихты проволоки за счет теплопередачи от расплавленной части металлической оболочки (рис. 5).

Заключение

1. Применение ИДС при сварке и наплавке высокохромистой порошковой проволокой позволяет получить устойчивое горение дуги с приемлемыми характеристиками формирования шва и отсутствием дефектов.

2. ИДС по всем макропоказателям предпочтительнее процесса сварки с естественными короткими замыканиями. Лучшие результаты дает наложение модифицированного импульса. При этом режиме потери металла на угар и разбрызгивание до 1,7 раза меньше, коэффициент наплавки и производительность до 1,5 раза выше, чем при сварке с естественными короткими замыканиями.

3. В импульсном режиме, наряду с мелкокапельным переносом, происходит формирование более крупных капель, вызывающих периодические короткие замыкания. Формирование капель различных размеров обусловлено различием теплофизических свойств шихты и оболочки порошковой проволоки.

Литература

1. Потапьевский А. Г. Сварка сталей в защитных газах плавящимся электродом. Техника и технология будущего : монография / А. Г. Потапьевский, Ю. Н. Сараев, Д. А. Чинахов. – Томск : ТПУ, 2012. – 208 с.
2. Dos Santos E. B. F. High frequency pulsed gas metal arc welding (GMAW-P): The metal beam process / E. B. F. Dos Santos, R. Pistor, A. P. Gerlich // Manufacturing Letters 2017. № 11. P. 1-4.
3. Розерт Р. Порошковые проволоки – тенденции, развитие и их применение в промышленности / Р. Розерт, М. В. Карасев // Петраньевские чтения. «Сварочные материалы – 2012» : докл. МНТК, 16–18 октября 2012 года. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 220–230.
4. Шлепаков В. Н. Физико-металлургические и сварочно-технологические свойства газозащитных порошковых проволок для сварки конструкционных сталей // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6-7. – С. 56-59.
5. Оценка параметров импульсно-дуговой сварки высокохромистой порошковой проволокой / Ю. С. Давыдов, Н. М. Разиков, Ю. С. Коробов [и др.] // Сварочное производство. – 2017. – № 6. – С. 14-20.

УДК 621.18.063:621.791

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
КОНВЕКТИВНОЙ ЧАСТИ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА
С ПРИМЕНЕНИЕМ СПОСОБОВ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ**

Л. Т. Плаксина¹, канд. техн. наук, plt2006@yandex.ru

А. В. Глухих², 2104@mail.ru

¹РГППУ, г. Екатеринбург, Россия

²АО «Энергоремонт Плюс», РПБ, пос. Рефтинский Свердловской обл.,
Россия

***Аннотация.** Разработана технология изготовления конвективной части водогрейного котла с применением спирально-ленточного оребрения труб увеличенного диаметра высокочастотной сваркой и стыковой контактной сварки оплавлением частей змеевика взамен применявшейся ранее ручной дуговой сварки. Проведенное технико-экономическое обоснование показывает значительное преимущество проектируемой технологии.*

***Ключевые слова:** водогрейные котлы, конвективная часть водогрейного котла, спирально-ленточное оребрение труб, оребрение труб, высокочастотная сварка, сварка давлением, стыковая сварка оплавлением, экономический эффект.*

Пиковый теплофикационный водогрейный котел ПТВМ-100 тепловой производительностью 100 Гкал/час предназначен как для покрытия пиков теплофикационных нагрузок ТЭЦ, так и в качестве основного источника теплоснабжения. Конвективная часть котла состоит из 96 левых и 96 правых полусекций. Каждая полусекция в базовом (существующем в настоящий момент варианте) состоит из 7 двухзаходных U-образных змеевиков (труба $\text{Ø}28 \times 3$ мм, Сталь 20), вваренных концами в стояки (труба $\text{Ø}83 \times 3,5$ мм Сталь 20) [1]. Змеевики расположены в шахматном порядке с шагами $S_1 = 64$ мм, $S_2 = 33$ мм. Трубы змеевиков каждой полусекции дистанционируются четырьмя вертикальными гребенками. По ходу газов конвективная часть разделена на два пакета, зазор между которыми составляет 600 мм (рис. 1).



Рис. 1. Котел ПТВМ-100, общий вид

Длительная эксплуатация с высокими температурными нагрузками, наружная и внутренняя коррозия, а также воздействие химически слабых растворов серы приводят к образованию свищей. Ремонт проводится путем разрезания стояка конвективной части и отглушения всего змеевика. После отглушения змеевиков конвективной части сокращается поток воды через котел, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления котла выше нормируемого и к росту потери давления сетевой воды с увеличением затрат электрической энергии на работу сетевых насосов. Отглушенные змеевики без протока по ним воды подвергаются перегреву дымовыми газами, особенно в первой ступени по ходу газов. Из-за перегрева материала змеевиков происходит их деформация и выгорание с последующим разрушением. Это приводит к снижению сопротивления газового тракта и, как следствие, к росту температуры уходящих газов и снижению КПД котла.

Изготовление и ремонт змеевиков с проставками и дистанционирующими гребенками в настоящее время не является автоматизированным даже частично и производится с помощью ручной дуговой сварки, что трудоемко и занимает достаточно много времени. Таким

образом, актуальным становится вопрос оптимизации изготовления конвективной части котла с повышенной тепловой эффективностью и надежностью и одновременным повышением уровня автоматизации и технико-экономических показателей. Одним из направлений существенного усовершенствования водогрейных котлов является применение труб увеличенного диаметра со спирально-ленточным оребрением [2, 3].

Важным эффектом от применения труб увеличенного диаметра является уменьшение вероятности закупорки проходных сечений внутренними отложениями, снижение трудозатрат за счет сокращения числа гибов, приварок труб к стоякам, а также снижение гидравлического сопротивления конвективных пакетов и повышение надежности работы котла. Применение спирально-ленточного оребрения приводит к повышению тепловой эффективности и эксплуатационной надежности теплообменной трубы. Верхние и нижние полусекции в проектируемом варианте предлагается изготавливать из труб $\text{Ø}38 \times 3,5$; 83×4 (Сталь 20), для спирального оребрения применить ленту размерами $1,0 \times 15$ (Сталь 08 кп), дистанционирующие элементы изготавливать из листа толщиной 5 мм (Сталь 12X18H10T), проставки из листа толщиной 5 мм (Сталь 20). Применение данных материалов обусловлено параметрами рабочей среды и условиями эксплуатации [3,4]. При внедрении модернизированной конвективной части с шагом оребрения $t_{op} = 5$ мм ожидаемое расчетное снижение температуры уходящих газов приблизительно 30 °С. Расчетные данные сравнительных характеристик базового и проектируемого вариантов конвективной части котла представлены в табл. 1. В обоих вариантах расход топлива (природного газа) на котел был принят одинаковым, равным $14000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

За счет снижения температуры уходящих газов в проектируемом варианте на 31 °С (по сравнению с базовым вариантом) КПД котла повысился на $1,7$ % (с $89,8$ % до $91,5$ %). Теплопроизводительность котла при этом увеличилась на $1,85$ Гкал/ч (с $100,62$ Гкал/ч до $102,47$ Гкал/ч), снижено гидравлическое сопротивление конвективных пакетов (57 кПа вместо 75 кПа) и аэродинамическое сопротивление (табл. 1).

Таким образом, анализ расчетных данных доказывает на целесообразность замены существующих конвективных гладкотрубных поверхностей нагрева на спирально-оребрённые трубы повышенного диаметра с применением способов сварки давлением. Применение способов сварки давлением в сравнении с применяемой на предприятии ручной дуговой сваркой имеет следующие преимущества: отсутствие необходимости

в операциях подготовки кромок и термообработки; высокую производительность (в 5-7 раз выше по сравнению с электродуговой сваркой); полную автоматизацию процессов сборки и сварки поворотных и неповоротных стыков; отсутствие необходимости в сварочных материалах; стабильное качество сварки; низкий уровень остаточных сварочных напряжений, физической и химической неоднородности металла после сварки.

Табл. 1. Сравнительная характеристика конвективной поверхности нагрева оребренных труб и существующей заводской из гладких труб

Наименование параметра	Конвективная поверхность нагрева из гладких труб (базовая конструкция)	Конвективная поверхность нагрева с применением оребренных труб (новая конструкция)
Типоразмер трубы, днхS	28х3	38х3,5
Параметры оребрения, hрбхtрбхSpб	-	13,5х5х1,0
Шаги шахматного трубного пучка, S1/S2	64/33	128/27; 128/42,5
Число пакетов по высоте газохода, шт.	2	2
Число полусекций, шт.	96х2 = 192	96х2 = 192
Количество рядов змеевиков в пакетах, шт.	192х2 = 384	192х1 = 192
Количество змеевиков в полусекциях (по высоте), шт.	7; 7	7; 7
Число параллельно включенных змеевиков в полусекции, шт.	14; 14	7; 7
Количество параллельно включенных змеевиков в КПН, шт.	1344; 1344	672; 672
Число приварок труб к стоякам, шт.	5376	2688
Число труб по ходу газов, шт.	28; 28	28; 28
Высота пакета по осям крайних труб, мм	925; 925	825; 1213
Высота поверхности, мм	2472	2603
Полная поверхность нагрева, мм ²	1475 + 1475 = 2950	996 + 7075 = 8075
Температура газов на входе в КПН, °С	1262	1262
Температура газов между пакетами, °С	337	569
Температура уходящих газов, °С	157	124
КПД котла, %	89,8	91,5

Теплопроизводительность котла, Гкал/ч	100,62	102,47
Температура воды на входе в КПН, °С	77	77
Температура воды на выходе в КПН, °С	150	152
Скорость газов, м/с	8,7; 4,2	7,8; 4,3
Скорость воды, м/с	1,4; 1,4	1,4; 1,4
Гидравлическое сопротивление кПа	75	57
Аэродинамическое сопротивление, Па	278	256
Масса поверхности нагрева с проставками (без учета стояков), G, т	31 + 31 = 62	24,8 + 52,3 = 77,1
В т.ч. труб, Gтр, т	62	24,8 + 25,2 = 50
В т.ч. ленты Gленты, т	-	27,1

Спирально-ленточное оребрение труб 38x3,5 выполняется в настоящее время с применением ленты толщиной $S = 1,0$ мм и шириной 15 мм (Сталь 08 кп) с шагом оребрения $t_{op} = 5,0$ мм на установке АСОТ-2М. Установка предназначена для спирального оребрения труб из углеродистых и нержавеющей сталей путем приварки ленты по спирали непрерывным швом к гладкой трубе. Приварка ленты осуществляется с нагревом током высокой частоты (высокочастотная сварка) на следующих режимах [5]:

Табл. 2. Режимы сварки спирального оребрения труб

Средний ток при оплавлении, А	Припуск на оплавление, мм	Средняя скорость оплавления, см/с	Скорость осадки, см/с	Усилие осадки, кгс/см ²	Припуск на осадку, мм
100	0,7	0,5	0,3	8	1

После спирально-ленточного оребрения трубы перемещают к трубогибочным станкам и к контактной стыкосварочной машине МСО-604, на которой производят сборку змеевиков труб с помощью контактной стыковой сварки оплавлением в соответствии с расчетами режимов [6, 7]:

Табл. 3. Режимы контактной сварки оплавлением

Средний ток при оплавлении, А	Припуск на оплавление, мм	Средняя скорость оплавления, см/с	Скорость осадки, см/с	Усилие осадки, Мпа	Припуск на осадку, мм
6 175	1	0,5	3	70	1

Наряду с соблюдением технических условий необходимо обязательное выполнение следующего комплекса мероприятий по контролю качества: визуально-измерительный контроль; металлографический контроль образцов сварных соединений; механические испытания на разрыв образцов соединений, полученных стыковой сваркой оплавлением; прогонка шаром; гидравлические испытания.

Технико-экономические расчеты базового и проектируемого вариантов [8] приведены в табл. 4.

Табл. 4. Технико-экономические показатели проекта

№ п/п	Показатели	Ед. измерения	Значение показателей		Изменение показателей (+,-)
			Базовый вариант	Проектируемый вариант	
1	Годовой выпуск продукции,	шт.	576	576	
2	Выручка от реализации годового выпуска продукции	руб.	31977578,88	39314376	7336797,12
3	Капитальные вложения	руб.	1048387,85	9026400	7978012,15
4	Технологическая себестоимость металлоизделия	руб.	24160015,94	25189402,29	1029386,36
5	Полная себестоимость годового объема выпуска металлоизделий	руб.	24600932,83	26209150,6	1608217,77
6	Прибыль от реализации годового объема выпуска	руб.	7376646,05	13105225,40	5728579,35
7	Годовой экономический эффект	руб.	2563874,36		
8	Численность производственных рабочих	чел.	2	2	
9	Производительность (выработка в расчете на 1 производственного рабочего, в базовых ценах)	тыс.руб./чел.	15988,78	19657,18	3668,4
10	Рентабельность продукции	%	30	50	20
11	Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений	лет	1,6		

12	Точка безубыточности (критический объем выпуска металлоизделий)	шт.	33	42	11
----	---	-----	----	----	----

Выводы:

1. В работе предлагается оптимизация изготовления конвективной части водогрейного котла за счет применения труб увеличенного диаметра со спирально-ленточным оребрением способом высокочастотной сварки и контактной сварки оплавлением частей змеевика взамен применявшейся ранее ручной дуговой сварки.

2. Применение труб увеличенного диаметра приводит к уменьшению вероятности закупорки проходных сечений внутренними отложениями, увеличивается поверхность нагрева, КПД котла и снижается температура уходящих газов.

3. Срок эксплуатации модернизированного котла возрастает до 5-10 лет, соответственно, уменьшаются затраты на аварийные и плановые ремонты котла, которые проводились минимум один раз в год в базовом варианте.

4. Проведенные технико-экономические расчеты показывают увеличение затрат на изготовление модернизированной конвективной части водогрейного котла. При этом внедрение проектной разработки приводит к повышению тепловой эффективности и эксплуатационной надежности котла, увеличивается КПД, снижается температура уходящих газов, существенно сокращается число аварийных и плановых ремонтов.

5. Технические показатели, полученные в результате исследования, подтверждают актуальность проектной разработки, повышение качества изготовления и экономическую значимость для предприятия.

Литература

1. ТУ 14-3-190-2004. Трубы стальные бесшовные для котельных установок и трубопроводов. – Введ. 2004-12-28. – М. : Госстандарт : Изд-во стандартов, 2004. – 16 с.
2. СТО ЦКТИ 10.002-2007. Стандарт организации. Элементы трубные поверхностей нагрева, трубы соединительные в пределах котла и коллекторы стационарных котлов. – Введ. 2007-11-01. – М. : Госстандарт : Изд-во стандартов, 2007. – 76 с.
3. РТМ 108.030.140-87. Расчет и рекомендации по проектированию поперечно-оребранных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов. – Введ. 1988-07-014.
4. Каталог государственных стандартов : база данных содержит классификатор и базу данных нормативных документов. – М. : RusCable.Ru, 1999. – Режим доступа: <http://gost.ruscable.ru/cgi-bin/catalog> (дата обращения: 19.12.2018).

5. Шамов А. Н. Высокочастотная сварка металлов / А. Н. Шамов, И. В. Лунин, В. Н. Иванов. – Л. : Машиностроение, 1977. – 200 с.
6. Орлов Б. Д. Технология и оборудование контактной сварки / Б. Д. Орлов, Ю. В. Дмитриев, А. В. Чакалев. – М. : Машиностроение, 1977. – 536 с.
7. Оборудование для контактной сварки : справ. пособие / под ред. В. В. Смирнова. – СПб. : Энергоатомиздат, СПб. отделение, 2000. – 848 с.
8. Прикладная экономика : учебник / Г. И. Журухин [и др.] ; под ред. Г. И. Журухина, Т. К. Руткаускас. – Екатеринбург : Изд-во ФГАОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2015. – 364 с.

УДК 001.04.621.791:006.354

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОНЯТИЯ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА

В. П. Сидоров, д-р техн. наук, vladimir.sidorov.2012@list.ru

ТГУ, г. Тольятти, Россия

***Аннотация.** Обоснована необходимость уточнения некоторых понятий для наплавленного при сварке металла и предлагается введение термина «добавленный металл».*

***Ключевые слова:** сварной шов, основной металл, наплавленный металл, химический состав, терминология.*

Регулирование химического состава сварных швов при сварке плавлением играет важную роль. Оно возможно изменением соотношения основного и сварочного материалов или концентрации легирующих элементов в сварочном материале. Второй путь представляется более затратным, однако здесь есть перспективы более широкого использования двухдуговых и двухэлектродных процессов сварки электродами различного химического состава [1], в которых комбинация содержаний наплавленного металла может быть весьма разнообразной.

Под сварочным материалом будем понимать его расширенное толкование, как совокупность всех сварочных материалов, участвующих в данном процессе при сварке. Например, при совместном использовании электродной проволоки, флюса и защитного газа они могут представляться и как единый сварочный материал. В этой связи имеется ряд вопросов по

основным понятиям в отношении основного и дополнительного материалов при сварке плавлением. Основные определения содержатся в ГОСТ 2601-84, в который внесены изменения в 1994 г. [2]. ГОСТ 2601-84 имеется в списке действующих на сайте комитета ТК-367 по стандартизации в сварке [3]. Наряду с ним известен терминологический стандарт ГОСТ ИСО [4], однако в нем определений связанных с составом наплавленного металла нет.

В пункте 115 [2] дается определение, что «основной металл – металл подвергающихся сварке соединяемых частей». Отсюда следует, что под это определение не подпадает понятие основного металла при наплавке. Кроме того, свариваемые металлы практически всегда можно рассматривать как сплавы. Поэтому более точным было бы следующее определение: **«Основной металл – сплав, подвергающийся сварке или наплавке»**. В случае сварки частей из разнородных сплавов данное определение можно использовать во множественном числе.

В пункте 120 [2] дается также следующее определение: «наплавленный металл – переплавленный присадочный металл, введенный в сварочную ванну или наплавленный на основной металл».

Данное определение также неудачно. Вторая его часть после частицы «или» представляется излишней. Как уже показано выше, в пункте 115 основной металл не указан в качестве объекта наплавки, а в пункте 120 он в этом качестве присутствует. Также не учитывается, что при наплавке, также как и при сварке, существует сварочная ванна и происходит, в большей или меньшей степени, расплавление основного металла. Поэтому металл, «наплавленный на основной металл», также как и при сварке, вводится в сварочную ванну. В металлургическом плане между наплавкой и сваркой нет никакого различия. Существенные различия имеются только в технологическом плане. При сварке в большинстве случаев стремятся получить максимальную глубину проплавления основного металла, а при наплавке, наоборот, желательна минимальное его проплавление. То, что при наплавке, как правило, не происходит соединения деталей, не имеет принципиального значения. Вообще наплавка может представляться как более общий процесс, а сварка, как ее частный случай. Да и первое практическое применение плавящегося электрода Н. Г. Славяновым было в области ремонта литейных дефектов. Такому восприятию, очевидно, помешало то, что сварка применяется в большем объеме, чем наплавка. При таком подходе сварку можно определить как «процесс наплавки, при котором происходит соединение деталей».

Словами «наплавленный» и «введенный» в пункте 120 [2] дважды подчеркнута, что это металл уже вошедший в состав шва. Однако при этом не учитывается, что дополнительный металл попадает в сварочную ванну и шов не только за счет переплавления присадочного металла, но и за счет протекания металлургических реакций между основным металлом и сварочным материалом. Далее, если присадочный металл переплавлен и введен в сварочную ванну, то есть уже наплавлен, то физически его невозможно выделить в металле шва. Наплавленный металл согласно данному определению как отдельный физический объект не существует и нельзя прямыми измерениями определить его свойства. Можно говорить о некоем гипотетическом сплаве в количестве, соответствующем количеству полученного в шве дополнительного металла. В то же время в специальной литературе устоялось употребление понятия наплавленного металла как отдельной субстанции. Например, повсеместно приводятся данные о химическом составе наплавленного металла или его механических свойствах [5,6]. Иначе говоря, сложившаяся трактовка понятия «наплавленный металл» соответствует тому, что это реальный сплав, полученный без взаимодействия сварочного материала с основным металлом до начала конкретного процесса сварки или наплавки. Определение стандарта [2] отождествляет дополнительный металл шва и наплавленный в процессе сварки. На то, что существует разница, указано в [5]. Она обусловлена некоторым отличием металлургических реакций при сварке при участии и без участия основного металла.

Чтобы сохранить сложившееся восприятие и употребление понятия «наплавленный металл», но в то же время уточнить его, предлагается изменить его определение на следующее: **«наплавленный (наплаваемый металл) – сплав, полученный из сварочного материала без участия основного металла»**. Уточнение в скобках «наплаваемый металл» призвано подчеркнуть, что речь идет о еще не введенном в сварочную ванну металле, а таком, который попадает в сварочную ванну в том же виде, в каком был получен без участия основного металла. В настоящее время известны два основных способа получения проб для определения химического состава наплавленного (наплаваемого) металла – многослойная наплавка и наплавка в медную форму [5].

Соответственно почти не требуется корректировки пункта 121 ГОСТ [2], в котором указано, что «металл шва – сплав образованный расплавленным основным и наплавленным металлами». Здесь опять понятие

«наплавленным» употребляется в смысле «наплавляемом». Однако и при таком смысле, это определение неточно. В нем можно опустить слово «расплавленным», так как понятие сплав подразумевает его получение расплавлением. Наряду с понятием «наплавленным», чтобы сохранить устоявшийся термин, должно быть указано «наплавляемым». Это подчеркивает, что на момент попадания в сварочную ванну речь идет о металле, не прошедшем взаимодействия с основным металлом. Кроме того, должно быть указание на роль металлургических реакций наплавляемого металла с основным металлом в образовании химического состава шва. Таким образом, предлагается следующее определение: **«металл шва – сплав, образованный в результате взаимодействия между основным и наплавленным (наплавляемым) металлами»**. Данное определение подчеркивает, что металл шва не является просто смесью основного и наплавляемого металлов, а в результате взаимодействия может получиться содержание, отличающееся от исходных сплавов. В данном случае понятие «наплавляемый металл» включает и взаимодействие в сварочной ванне всего сварочного материала в комплексе, поскольку взаимодействие в сварочной ванне при сварке или наплавке протекает в тех же условиях, что и при получении «чистого» наплавляемого металла, но с участием основного металла.

Однако при уточнении трех приведенных выше определений из ГОСТ 2601-84 необходимо введение нового понятия, которое можно назвать, например, «добавленный металл шва». По сути, весь металл, появившийся в шве помимо основного металла, независимо от его происхождения, является добавленным. Количественно его массу несложно определить соответствующими измерениями. Поэтому необходимым представляется определение, что **«добавленный металл шва – условный сплав, химический состав которого рассчитан по химическим составам основного металла и шва»**.

Содержание химических элементов C_D в условном сплаве в % (добавленном металле) определяется на основе формулы смешения

$$C_D = \frac{C_{ш} - C_0 \psi_0}{1 - \psi_0},$$

где $C_{ш}$ – содержание данного элемента в сварном шве, %, C_0 – содержание элемента в основном металле, %, ψ_0 – доля участия основного металла в металле шва.

Разность в химических составах наплавленного (наплавляемого) металлов и добавленного металлов дает представление о роли основного металла в металлургических процессах при сварке и наплавке. Принято считать, что разница между составом добавленного и наплавляемого металлов невелика [5], однако она может быть значимой при интенсивных металлургических процессах в сварочной ванне. Изучение разницы в составах добавленного и наплавляемого металлов может дать полезную информацию о процессах в сварочной ванне при изменении условий ее существования. В случаях, когда будет установлено, что разницей можно пренебречь, можно будет отказаться от дорогостоящего определения химического состава наплавляемого металла и рассчитывать его на основе измерений составов шва и основного металла обычных сварных швов, выполненных в стандартизированных условиях.

Вывод

Ряд понятий в ГОСТ 2601-84 требует корректировки и дополнения.

Литература

1. Пат. 263748 Российская Федерация, МПК В23К 9/14. Способ дуговой двухэлектродной сварки покрытыми электродами / В. П. Сидоров ; заявитель и патентообладатель В. П. Сидоров. – № 2016137931, Бюл. № 36.
2. ГОСТ 2601-84. Сварка металлов. Термины и определение основных понятий. – Изменен 06.1992. – М. : Издательство стандартов, 1997. – 57 с.
3. Официальный сайт Национальной ассоциации контроля сварки. – Режим доступа: <http://www.tk364.naks.ru/nd/list/> (дата обращения: 12.11.2018).
4. ГОСТ Р ИСО 857-1. Сварка и родственные процессы. Словарь. Часть 1. Процессы сварки металлов. Термины и определения. – Введ. 2010-07-01. – М. : Стандартиформ, 2010. – 50 с.
5. Сварка в машиностроении : справочник : в 4-х т. – Т. 1 / под ред. Н. А. Ольшанского. – М. : Машиностроение, 1978. – 504 с.
6. Чувашова А. В. Электроды для ручной дуговой сварки, применяемые на опасных производственных объектах, подконтрольных Ростехнадзору. – Ижевск : Изд-во ЗАО «Ижмашпринт», 2006. – 70 с.

УДК 621.791

НАПЛАВКА ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ДУГОЙ, ПИТАЕМОЙ РАЗНОПОЛЯРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ ТОКА

В. П. Сидоров, д-р техн. наук, vladimir.sidorov.2012@list.ru

Д. Э. Советкин

ТГУ, г. Тольятти, Россия

***Аннотация.** Приводятся данные по наплавке покрытыми электродами на установке с регулируемой длительностью разнополярных импульсов тока в режиме TIG-сварки, позволяющем реализовать технологические преимущества сварки при прямой полярности дуги.*

***Ключевые слова:** покрытый электрод, разнополярные импульсы, баланс полупериодов, наплавка.*

Сварка большинства ответственных сварных конструкций плавящимися электродами, в том числе покрытыми, выполняется при обратной полярности дуги. Прямая полярность применяется редко, что связывают с блужданием дуги на поверхности торца плавящегося электрода, которая приводит к нестабильности скорости расплавления последнего [1]. Спорным является вопрос, на какой полярности выше производительность расплавления покрытого электрода и, соответственно, проплавляющая способность дуги [2]. Для сварки от сварочных трансформаторов на переменном токе промышленной частоты могут использоваться только некоторые марки электродов, в покрытие которых вводятся вещества для стабилизации повторных зажигания дуги при смене ее полярности. В то же время прямая полярность дуги может в ряде случаев давать значительные технологические преимущества: повышение производительности наплавки при заполнении разделки кромок, использование катодной очистки их поверхности, улучшение качества формирования поверхности корневого слоя шва, снижение магнитного дутья аналогично дуге переменного тока и некоторые другие. Однако при этом рекомендуют использовать специальные электроды, выпускаемые фирмой «Bohler Welding Group» [3].

В настоящее время все большее применение находят установки для сварки с разнополярными импульсами прямоугольной формы (РПИ) [4]. Такие установки для автоматической сварки под флюсом обеспечивают повышение производительности расплавления и снижение магнитного взаимодействия дуг при двухдуговой сварке. За счет изменения соотношения длительности импульсов появляется возможность более гибкого и плавного изменения соотношения между наплавляемым и проплавленным основным

металлами. На универсальных установках меньшей мощности выполняют сварку алюминиевых сплавов в режиме РПИ [5] и покрытыми электродами дугой постоянного тока.

Успешное применение РПИ для сварки под флюсом ставит вопрос о целесообразности аналогичного использования такого вида дуги при сварке покрытыми электродами. Поэтому представляет интерес исследование технологических возможностей наплавки покрытыми электродами на установках с РПИ. При этом можно предположить, что за счет нестационарности тока дуги может быть уменьшено блуждание катодного пятна на электроде при сохранении преимуществ дуги прямой полярности.

Для опытов был применен инверторный аппарат Brima TIG200P, в режиме TIG- сварки с прямоугольными разно-полярными импульсами тока. Его характеристики приведены в табл. 1 [6].

Табл. 1. Основные технические характеристики Brima TIG200P

Параметры электросети (В)	1 фазное напряжение 220 + 10%
Номинальный сварочный ток (А)	200
Пределы регулирования сварочного тока (А)	10...200
Напряжение холостого хода (В)	56
Рабочая частота (Гц)	60
Изменение баланса полярности %	20...80
Способ возбуждения дуги	Высокочастотный
ПВ (%)	60

Для обеспечения функционирования источника питания в режиме TIG при сварке покрытыми электродами кабель управления от TIG горелки подключался в соответствующий разъем (рис. 1, поз. 2), а к положительному полюсу источника – кабель электрододержателя покрытого электрода (рис. 1, поз. 3). К изделию подключался токоведущий кабель от отрицательного полюса источника (рис. 1, поз.1).

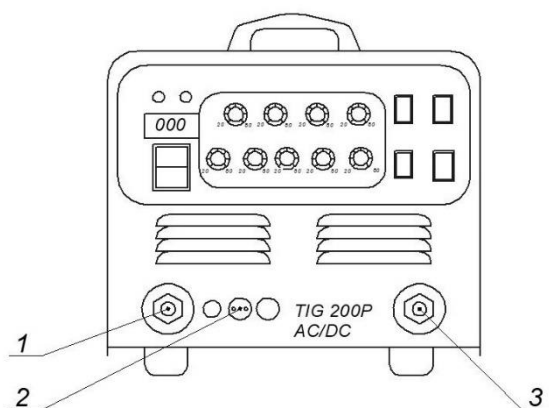


Рис. 1. Подключения на передней панели установки: 1 - «минус» источника, 2 - кабель управления, 3 - «плюс» источника

Вначале изучали форму внешней характеристики источника питания (ВХ) в режиме TIG – сварки (рис. 2).

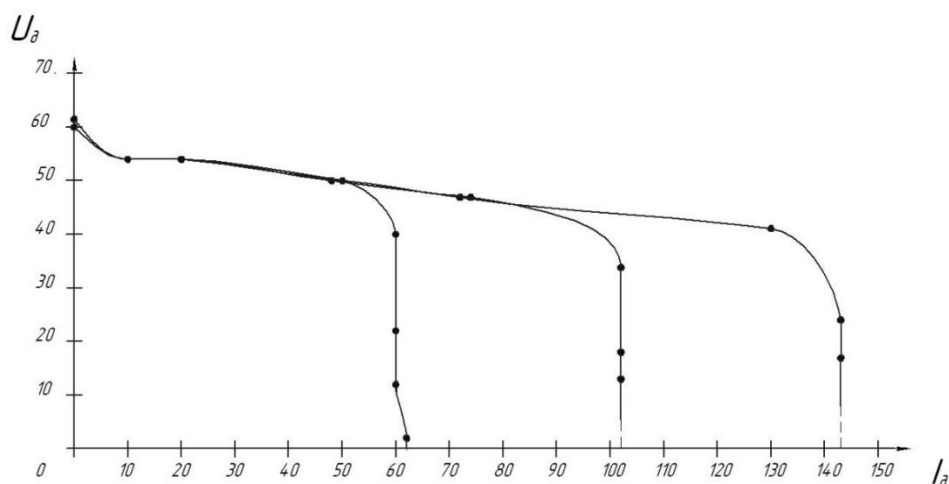


Рис. 2. Внешние характеристики Вгма TIG200P при различных максимальных токах

Внешние характеристики имеют вид, который принято характеризовать как «штыковой». Рабочей областью являются вертикальные участки ВХ. При такой форме в ситуации, когда имеют место отклонения длины дуги (ручная сварка) ток дуги не изменяется. В связи с тем, что на проплавление изделия ток влияет значительно больше, чем напряжение дуги, такой вид ВХ для ручной сварки является оптимальным.

Наплавку на пластины из стали Ст3 проводили электродами марки LB – 52U диаметром $d = 3,2$ мм, фирмы Kobe Steel Диаметр электродов с покрытием 5,0 мм. Упаковка электродов имеет маркировку AC/DC, что свидетельствует о том, что электроды рекомендованы как для постоянного, так и для переменного тока. Задаваемый производителем диапазон токов для

нижнего положения сварки 90-140 А. Ток дуги оставался постоянным во всех опытах $I = 90$ А. Изменялся только баланс полупериодов от 20-80 % с шагом 20 %.

Процесс наплавки валиков производился в следующей последовательности:

1. С помощью кнопки управления горелкой TIG (рис. 1, поз. 3) на источнике питания включался высокочастотный блок, у которого есть два режима работы 2Т и 4Т. 2Т-режим применяется для сварки короткими швами, нажатие кнопки управления горелкой запускает процесс сварки, отпускание – прерывает. Наплавку вели в режиме 4Т, при котором сварка начинается после кратковременного нажатия кнопки управления на горелке и отключается после повторного нажатия. В результате дуга зажигалась без короткого замыкания, поджиг дуги обеспечивал высокочастотный блок установки. Это можно отнести к одному из преимуществ сварки на такой установке, когда отсутствует возможность появления дефектов в шве, связанных с контактным зажиганием.

2. Наплавка производилась посредством последовательного сгорания покрытой части электрода, при этом секундомером измеряли время горения дуги. В конце замерялась длина огарка и рассчитывалась длина расплавленной части электрода, средняя скорость расплавления. Затем время расплавления приводилось к полной длине покрытой части электрода.

Расплавление электрода и горение дуги протекало стабильно, ни при каких значениях балансах тока блуждания дуги не наблюдалось (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид наплавки при сварке с РПИ при балансе полупериодов:
1 – 80/20 %; 2 – 60/40 %; 3 – 40/60 %, 4 – 20/80 %

В работе [7] для данной марки электродов установлено различие в скоростях расплавления на токах 90-140 А, которое составляет +15 % для обратной полярности по отношению к прямой. Такое различие нельзя отнести к существенным недостаткам дуги прямой полярности, поскольку более важным является получение качественного шва. Скорость расплавления электродов V_P при использовании РПИ можно определять по формуле:

$$V_P = V_O \cdot \varphi + V_{II} \cdot (1 - \varphi), \quad (1)$$

где V_O – скорость расплавления на обратной полярности дуги; V_{II} – скорость расплавления на прямой полярности дуги; φ – доля длительности обратной полярности в периоде разнополярных импульсов. При соотношении балансов полупериодов 20/80 % длительности обратной полярности $\varphi = 0,2$.

Полученные скорости расплавления при использовании соотношения балансов 80/20 % совпали с расчетными, полученными по формуле (1).

Выводы

1. На универсальных установках с РПИ можно обеспечить сварку покрытыми электродами в режиме TIG с регулированием баланса полярностей. При этом обеспечивается бесконтактное зажигание дуги и ее стабильное горение на режимах с различным балансом.
2. Разработчикам установок с РПИ для ручной сварки целесообразно рассмотреть возможность создания удобной опции для реализации режима РПИ при сварке покрытыми электродами.

Литература

1. Ленивкин В. А. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах / В. А. Ленивкин, Н. Г. Дюргеров, Х. Н. Сагиров. – М. : Машиностроение, 1989. – 264 с.
2. Федосов С. А. К вопросу о влиянии полярности на глубину проплавления и скорость сварки / С. А. Федосов // Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства : сб. материалов Всероссийской науч.-техн. конф. (Тольятти, 25-28 октября 2011 г.) / под ред. В. П. Сидорова [и др.] – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2011. – С. 97-98.
3. К вопросу о сварке на прямой полярности / В. Г. Лозовой, О. В. Дзюба, В. М. Дзюба [и др.] // Сварка и диагностика. – 2014. – № 6. – С. 55-59.
4. Коберник Н. В. Влияние рода и полярности тока на плавление электродного и основного металла при сварке под флюсом / Н. В. Коберник // Сварка и диагностика. – 2011. – № 5. – С. 24-27.
5. Проплавливающая способность дуги переменного тока с прямоугольной формой импульсов / В. А. Савинов, О. А. Полесский, И. Е. Лапин [и др.] // Известия ВолГТУ. – 2016. – № 2. – С. 135-141.

6. Руководство по эксплуатации инверторного аппарата (TIG). – СПб., 2011. – 14 с.
7. Сидоров В. П. Влияние полярности на скорость расплавления покрытых электродов / В. П. Сидоров, С. В. Абрамова // Современные проблемы сварочного производства : сборник научных трудов / под ред. М. А. Иванова, И. А. Ильина. – Челябинск : Издательский Центр ЮУрГУ, 2016. – С. 18-21.

УДК 621.791.75

К РАСЧЕТУ РЕЖИМОВ ОДНОСТОРОННЕЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

В. П. Сидоров, д-р техн. наук, vladimir.sidorov.2012@list.ru

ТГУ, г. Тольятти, Россия

***Аннотация.** Проанализированы затраты энергии, в зависимости от толщины свариваемых листов для дуговой автоматической сварки под флюсом односторонних стыковых соединений без разделки кромок. Получены коэффициенты зависимостей удельной энергии сварки от толщины пластин. На основе этого предложена методика расчета эффективной мощности, тока и напряжения дуги в зависимости от производительности образования соединения.*

***Ключевые слова:** сварка под флюсом, односторонний шов, производительность соединения, режим, энергия сварки.*

Введение

Известная методика расчета режимов сварки под флюсом [1] базируется на использовании формулы для быстродвижущегося источника тепла на поверхности полубесконечного тела. Эта методика не учитывает зависимость режимов сварки от свариваемой толщины. Во многих случаях параметры сварки не позволяют относить источник тепла к точечным или быстродвижущимся.

В качестве основы расчетного подхода можно использовать анализ энергетических характеристик рекомендуемых режимов сварки. Важной характеристикой сварочных процессов является удельная энергия сварки E [2]. При сварке плавлением стыковых соединений без разделки кромок:

$$E = \frac{q_H}{V_C h}, \quad (1)$$

где q_H – эффективная мощность источника тепла, V_C – скорость сварки, h – максимальная глубина проплавления. При односторонней сварке $h = \delta$, где δ – свариваемая толщина.

Чем меньше E для свариваемого слоя, тем меньшее термическое воздействие на основной металл оказывает источник тепла. В работе [2] приводятся данные, согласно которым для различных способов сварки величины E существенно отличаются. Закономерности изменения E для конкретных способов сварки исследованы недостаточно. В работе [3] утверждается, что при дуговой сварке E линейно возрастает с увеличением свариваемой толщины. В работе [4] исследованы теоретические зависимости для E при использовании расчетной схемы точечного источника тепла, движущегося на поверхности полубесконечного тела с ограниченной скоростью и распределенного источника тепла на поверхности пластины.

Знаменатель выражения (1) $J = V_C h$ представляет производительность образования соединения при сварке и может играть важную роль при оценке эффективности сварочных процессов, поскольку все материальные и энергетические затраты следует относить к этой величине.

Методика исследований

Рассчитывали и анализировали значения удельной энергии автоматической односторонней сварки под флюсом дугой обратной полярности [5]. Эффективный КПД дуги принимался во всех случаях 0,83 [6]. Учитывались данные для различных диаметров электрода. При расчетах из исходных таблиц использовались средние значения тока и напряжения дуги. Зависимость удельной энергии от толщины аппроксимировали с помощью компьютерной программы [7] линейной функцией

$$E = A_0 + A_1 \cdot \delta \quad (1)$$

с коэффициентами A_0 , A_1 .

Также в [1] приводится формула для расчета напряжения дуги

$$U = 20 + \left(0,05 \frac{I}{d^{0,5}} \right), \quad (2)$$

где I – ток дуги, d – диаметр электродной проволоки, мм.

В данной работе сравнивали напряжения дуги из режимов сварки с расчетными по эмпирической формуле (2) (табл. 2).

Результаты и их обсуждение

Исходные данные режимов и результаты расчетов приведены в табл. 1.

Табл. 1. Энергетические характеристики процесса сварки на обратной полярности

δ , мм	d , мм	I , А	U , В	V_c , мм/с	J , мм ² /с	E , Дж/мм ²
3	2	275-300	28-30	12,2	37	174
4	2	375-400	28-30	11,1	44	194
4	3	420-460	28-30	11,1	44	220
5	2	425-450	32-34	9,7	49	227
5	4	540-580	30-32	11,1	56	240
6	2	440-480	32-34	8,3	50	232
6	4	640-680	32-34	11,1	67	250
8	4	820-860	38-40	11,1	89	282
8	5	860-900	36-38	10,3	82	303
10	5	940-980	38-40	9,7	97	295

Среднее значение для удельной энергии сварки для всех режимов 241,7 Дж/мм². Для формулы (1) получили $A_0 = 135,5$ Дж/мм²; $A_1 = 17,53$ Дж/мм. Средняя сходимость отклонений аппроксимированных данных, взятых по отношению к опытным, по абсолютной величине 2,3 %, максимальное расхождение $\Delta = 8$ %. Таким образом, формула (1) хорошо описывает затраты энергии на одностороннюю сварку. Производительность соединения с увеличением толщины в 3 раза увеличилась примерно в 2 раза. Можно предположить, что и в области малых толщин может быть достигнута максимальная производительность соединения J .

Табл. 2. Расчетные U_p и опытные данные по напряжению дуги для обратной полярности

δ , мм	3	4	4	5	5	6	6	8	8	10
d , мм	2	2	3	2	4	2	4	4	5	5
U , В	29	29	29	32-34	30-32	32-34	32-34	38-40	36-38	38-40
I , А	275-300	375-400	420-460	425-450	540-580	440-480	640-680	820-860	860-900	940-980
U_p , В	30,1	33,7	32,7	35,5	34	36,3	36,5	41	39,9	41,5
Δ , %	+3,8	+16,2	+12,8	+7,5	+9,7	+10	+10,6	+5,1	+7,8	+6,4

В табл. 2 все относительные отклонения положительны, то есть расчетные данные больше опытных значений. Среднее относительное отклонение $\Delta \approx 9,0$ %. Следовательно, расчетные значения напряжения следует умножать на 0,91.

На основе полученной зависимости (1) можно предложить методику расчета параметров сварки. Следует предположить, что производительность

соединения для всех толщин может изменяться в диапазоне значений табл. 1. $V_C\delta = 0,4-1,0$ см²/с. Задавшись значением $V_C\delta$, для расчета требуемой эффективной мощности следует использовать выражение

$$q_{II} = (A_0 + A_1\delta) \cdot V_C\delta. \quad (3)$$

Для определения необходимого сварочного тока рассчитаем напряжение дуги по формуле (2), полную мощность дуги и приняв эффективный КПД $\eta = 0,83$, получим квадратное уравнение относительно тока дуги

$$q_{II} = 0,83 \cdot 0,91 \left(20 \cdot I + 0,05 \frac{I^2}{d^{0,5}} \right). \quad (4)$$

При этом необходимо задать диаметр электрода, который сравнительно мало влияет на эффективную мощность дуги. Для каждого диаметра электрода плотность тока может изменяться в определенном диапазоне [1], то есть диапазоны возможного изменения тока в уравнении (4) ограничены.

Данные по рекомендуемым плотностям тока также можно аппроксимировать гиперболическими зависимостями вида

$$J = J_0 + \frac{K}{d}. \quad (5)$$

В результате получили значения коэффициентов формулы (5) для минимальных, максимальных и средних плотностей тока, которые приведены в табл. 3.

Табл. 3. Коэффициенты аппроксимации для формулы (5)

Коэффициенты	J_0 , А/мм ²	K , А/мм	Δ , %
Для J_{\min}	5,68	118,7	0,9
Для J_{\max}	-47,8	471,9	16,3
Для J_C	-21,1	295,3	9,2

Наилучшую среднюю относительную сходимость Δ формула (5) дает при минимальных плотностях тока J_{\min} , а худшую – для максимальных J_{\max} . Поэтому при расчетах следует ориентироваться на средние плотности тока, показывающие приемлемую сходимость.

Пример 1. Рассчитаем режим сварки толщины 6 мм на постоянном токе обратной полярности. Допустим, что производительность соединения требуется повысить до 1,0 см²/с. Требуемая для этого удельная энергия сварки по формуле (1) $E = 135,5 + 17,5 \cdot 6 = 240,5$ Дж/мм². Расчетная удельная энергия незначительно отличается от опытных значений табл. 1. Тогда эффективная мощность при $J = 1,0$ см²/с $q_{II} = 24050$ Вт. Решая уравнение (4)

при $d = 2$ мм получаем $I = 700$ А, при $d = 4$ мм $I = 800$ А. Скорость сварки $V_C = 100/6 = 16,7$ мм/с.

В табл. 4 приведены результаты аналогичного анализа для односторонней сварки дугой переменного тока на флюсовой подушке с обязательным зазором [5], выполненные по аналогичной методике, что и для табл. 1. Средние значения переменного тока из табл. 4 делились на коэффициент 1,11, учитывающий несинусоидальную форму напряжения дуги [8].

Табл. 4. Энергетические характеристики процесса сварки дугой переменного тока

δ , мм	Зазор, мм	dЭ, мм	Ток, А	УД, В	V_C , мм/с	J, мм ² /с	E, Дж/мм ²
4	1-1,5	4	520-550	28-30	13,9	55,6	209
6	2-3,0		600-650	28-32	11,1	66,6	211
8	2-3,5		625-675	32-36	9,44	75,5	219
10	3-4	5	700-750	34-36	8,33	83,3	228
12	4-5		750-800	36-40	7,5	90,0	245
16	5-6		900-950	38-40	5,56	89,0	301
18			950-1000	40-42	4,7	84,6	353
20			42-44	4,17	83,4	376	

Из данных табл. 4 видно, что при малых толщинах изменение удельной энергии сварки незначительно, но существенно возрастает с толщины 12 мм. При увеличении свариваемой толщины в 5 раз, удельная энергия возросла менее чем в 2 раза. Сравнение сварки на обратной полярности и сварки на переменном токе (табл. 3 и табл. 1) при одинаковых толщинах 8-10 мм показывает, что сварка на переменном токе в данном случае существенно эффективнее. Это объясняется использованием на переменном токе гарантированного зазора, который обеспечивает большее погружение активных пятен дуги в зазор и повышение эффективности проплавления основного металла.

Зависимость E от толщины аппроксимировали параболической зависимостью [7]

$$E = A_0 + A_1\delta + A_2\delta^2. \quad (5)$$

Коэффициенты аппроксимации $A_0 = 225,2$ Дж/мм², $A_1 = 6,98$ Дж/мм³, $A_2 = 0,74$ Дж/мм⁴. Среднее относительное отклонение по абсолютной величине аппроксимирующих данных от табличных всего 1,25 %, максимальное отклонение для толщины 18 мм 3,5 %. Реальные значения производительности соединения в табл. 3 изменяются в пределах 0,55-0,90 см²/с. Поэтому при расчете режимов сварки следует ориентироваться на

значение $E = 0,9 \text{ см}^2/\text{с}$. В этом случае можно получить существенное повышение производительности сварки.

Также и для этого способа выполняли проверку сходимости расчета напряжения дуги по формуле (2). В этом случае следует использовать действующее значение токов из табл. 3.

Табл. 5. Сравнение расчетных U_p и опытных данных по напряжению дуги переменного тока

δ , мм	4	6	8	10	12	16	18	20
d , мм	4	4	4	5	5	5	5	5
U , В	29	30	34	35	38	39	41	43
I , А	535	625	650	725	775	925	975	975
U_p , В	33,4	35,6	36,3	36,2	37,3	40,7	41,8	41,8
Δ , %	+15,2	+18,7	+6,8	+3,4	-1,8	+4,4	+2,0	-2,8

Среднее относительное отклонение по абсолютной величине расчетных значений от опытных составляет 6,9 % (табл. 5). Это являлось бы хорошим результатом, но отклонения в области токов 500-600 А слишком велики.

Пример 2. Рассчитаем режим сварки толщины 8 мм дугой переменного тока. Допустим, что скорость соединения можно повысить до $1,0 \text{ см}^2/\text{с}$, достигнутых в табл. 1, тем более, что способ сварки с гарантированным зазором более эффективен в энергетическом отношении. Удельная энергия сварки $E = 225,2 - 6,98 \cdot 8 + 0,74 \cdot 8^2 = 217 \text{ Дж}/\text{мм}^2$.

Аппроксимирующее значение E с высокой точностью совпадает с табличным.

Тогда эффективная мощность при $J = 1,0 \text{ см}^2/\text{с}$ $q_{\text{и}} = 21700 \text{ Вт}$. Решая уравнение (4) при $d = 4 \text{ мм}$ получаем $I = 745 \text{ А}$, при $d = 5 \text{ мм}$ ток $I = 770 \text{ А}$. При этом ток при $d = 5 \text{ мм}$ будет обеспечивать существенно меньшую производительность наплавки и выпуклость шва [1]. Получается, что требования к источнику сварочного тока практически одинаковы и режим сварки следует выбирать исходя из наличия сварочной проволоки или требований к выпуклости шва. Скорость сварки $V_c = 100/8 = 12,5 \text{ мм}/\text{с}$.

Выводы

1. Удельная энергия соединения при односторонней сварке дугой обратной полярности стыковых соединений без разделки кромок линейно возрастает с толщиной металла.

2. Для описания удельной энергии сварки дугой переменного тока стыковых соединений с гарантированным зазором хорошо подходит параболическая функция.

3. Предложена методика расчета ориентировочных режимов сварки под флюсом односторонних сварных соединений без разделки кромок, учитывающая зависимости удельной энергии сварки от свариваемой толщины и напряжения сварки от тока дуги.

4. Расчет ориентировочных режимов односторонней сварки целесообразно проводить на основе полученных формул для удельной энергии сварки и максимальных значений производительности образования соединения $V_{сд}$. При этом производительность соединения может быть повышена до двух раз.

Литература

1. Акулов А. И. Технология и оборудование сварки плавлением / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. – М. : Машиностроение, 1977. – 432 с.
2. Теория сварочных процессов / А. В. Коновалов, А. С. Куркин, Э. Л. Макаров [и др.] ; под ред. В. М. Неровного. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 752 с.
3. Основы сварки судовых конструкций / С. Б. Андреев [и др.] – СПб. : Судостроение, 2006. – 552 с.
4. Сидоров В. П. Двухдуговая двухсторонняя сварка неплавящимися электродами в аргоне / В. П. Сидоров, С. А. Хурин. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2015. – 191 с.
5. Алексеев Ю. Е. Оборудование для дуговой сварки под флюсом / Ю. Е. Алексеев, Л. Н. Кушнарев. – Л. : Энергия, 1977. – 128 с.
6. Цвелев Р. В. Оценка погрешностей воспроизведения температурного поля при сварке под флюсом на основе эквивалентного источника теплоты // Сварочное производство. – 2013. – № 6. – С.11-15.
7. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ. – М. : Наука, 1987. – 240 с.
8. Ерохин А. А. Основы сварки плавлением. – М. : Машиностроение, 1973. – 448 с.

УДК 621.793

НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

А. С. Смоленцев, a.s.smolentsev@mail.ru

УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

АО «Уралтрансмаш», г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Представлены основные подходы к выбору сварочного материала для сварки высокопрочных среднелегированных сталей. Предложено использовать для сварки данных сталей с целью повышения прочностных характеристик металла шва новую порошковую проволоку ПП-10X18Г8АМ аустенитного класса с содержанием азота до 0,3 %. Рассмотрены физические основы различного поведения углерода и азота в твердых растворах, выполнена расчетная оценка механических характеристик сварных соединений.

Ключевые слова: дуговая сварка, структура, холодные трещины, зона термического влияния, среднелегированные стали, высокопрочные стали, порошковая проволока, аустенит.

Существенной проблемой при сварке высокопрочных среднелегированных сталей является высокая склонность металла шва (МШ) и зоны термического влияния (ЗТВ) к образованию холодных трещин (ХТ), повышенная склонность к горячим (кристаллизационным) трещинам (ГТ) из-за многокомпонентного легирования металла шва. При многослойной сварке аустенитным электродным металлом сохраняется опасность образования «подваликовых» кристаллизационных трещин и трещин в виде «отколов» в околошовной зоне (ОШЗ). Другой существенной проблемой при сварке данных сталей является получение механических свойств МШ и ОШЗ аналогичных или близких основному металлу (ОМ).

Слабым звеном сварных конструкций часто является не только сам сварной шов, формирующийся из расплавленного жидкого металла, но и ЗТВ, в которой сталь испытывает фазовые и структурные превращения, связанные как с нагревом, так и с охлаждением [1]. Снижение пластичности и вязкости металла ОШЗ, а также образование в ней ХТ [2–5] является типичной проблемой при сварке высокопрочных среднелегированных сталей.

Одним из путей решения проблемы свариваемости высокопрочных среднелегированных сталей является применение электродных материалов, имеющих близкий химический состав с ОМ (Св-20ГСТЮА, Св-20Х4ГМА; ГОСТ 2246-70). Для исключения появления ХТ в данном случае сварку осуществляют с предварительным и (или) сопутствующим подогревом.

После сварки выполняют полную термообработку сварной конструкции (улучшение). Данная технология позволяет получать сварные соединения с высокими прочностными показателями.

Сварка крупногабаритных изделий вносит определенные трудности при производстве изделия. Сложная конструктивная форма изделий, большие габариты и значительная масса ограничивают использование предварительного и сопутствующего подогрева. Нередко термическая обработка неосуществима по причине необходимости создания энергоемких больших печей для отпуска, а также сжатых сроков между окончанием сварки и термообработкой для исключения образования ХТ. При этом достичь равнопрочности МШ и ОМ не представляется возможным.

В связи с этим, на сегодняшний день сварку высокопрочных среднелегированных сталей без послесварочной термообработки осуществляют с использованием феррито-перлитного или аустенитного электродного материала. Стоит отметить, в этом случае на сборку-сварку сталь поставляется в термоупрочненном состоянии. Использование данных сварочных материалов при сварке высокопрочных среднелегированных сталей позволяют получить в МШ феррито-перлитную (мартенситно-бейнитную) и аустенитную (аустенитно-ферритную) структуру соответственно.

При дуговой сварке под флюсом и в защитных газах среднелегированных сталей типа 30ХГСА находят применение сварочные проволоки феррито-перлитного класса Св-10ГСМТ, Св-08ХЗГ2СМ, Св-10ХГСН2МТ (ГОСТ 2246-70) [6].

При сварке аустенитными швами среднеуглеродистых сталей (30ХГСА, 30ХГСН2А и др.), обработанных на высокую прочность (1300–1700 МПа), также надо учитывать некоторые особенности. Технология получения аустенитных швов (например, типа 10Х16Н25АМ6), с одной стороны, должна позволить отказаться от термической обработки сварных соединений и получить металл шва с достаточно высокой вязкостью (1,2–1,6 МДж/м²), с другой стороны – металл шва должен обладать уровнем прочности, близким к уровню прочности свариваемой стали (аустенитные швы типа 10Х16Н25АМ6 характеризуются $\sigma_s < 700$ МПа) [7]. В ряде случаев для сварки сталей этого класса может использоваться высоколегированная нержавеющая проволока, обеспечивающая аустенитную или аустенитно-мартенситную структуру шва. Такие швы обладают высокой пластичностью и достаточной прочностью [8].

Однако имеющиеся подходы к выбору сварочного материала не в полной мере удовлетворяют возросшим требованиям к сварным соединениям по прочностным и эксплуатационным характеристикам, которые предъявляются в последнее время к изделиям ответственного назначения. Очевидно, что повышение механических характеристик МШ и ЗТВ является актуальной проблемой, решение которой до сих пор до конца не найдена.

Для повышения прочностных характеристик металла шва разработана новая экономнолегированная порошковая проволока аустенитного класса ПП-10Х18Г8АМ (см. табл. 1) с системой легирования *Fe-Cr-Mn-Mo-N* для сварки высокопрочных среднелегированных сталей.

Табл. 1. Химический состав разработанной порошковой проволоки

Марка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	S	P
ПП-10Х18Г8АМ	0,07...0,12	0,20...0,30	7,50...8,50	18,0...19,0	≤ 0,30	0,45...0,55	0,20...0,30	≤ 0,015	≤ 0,020

Использование марганца и азота, как легирующих элементов, перспективно с точки зрения экономии никеля и получения хорошего комплекса механических и антикоррозионных свойств [9].

Добавление азота в количестве до 0,3 % приводит к расширению γ -области, что позволяет получить в металле шва аустенитную структуру. Кроме того, аустенитная структура положительно влияет на трещиностойкость МШ и ЗТВ. Известно [10–13], что высокая стойкость против образования ХТ у сварных соединений, имеющих аустенитную структуру, объясняется повышенной деформационной способностью аустенитного металла и возможным понижением уровня напряжений в ЗТВ вследствие локализации деформации в шве.

Рассмотрим более подробно причины различного влияния атомов углерода и азота в твердых растворах на прочностные характеристики металла шва.

В работах [14, 15] существующие физические основы различного поведения атомов углерода и азота в твердых растворах *Fe-C*, *Fe-N* объясняются тем, что легирование сталей азотом увеличивает концентрацию электронов проводимости, усиливая металлических характер межатомного взаимодействия, что объясняет повышение ударной вязкости и вязкости разрушения. Кроме того, твердые растворы системы *Fe-N* склонны к

ближнему упорядочению атомов, в отличие от атомов углерода в системе $Fe-C$, где могут образовываться кластеры. Ближний атомный порядок в системе $Fe-N$ является причиной их повышенной термодинамической стабильности.

Причина разного влияния углерода и азота заключается в различии электронного обмена между атомами этих межузельных элементов и атомами железа. В отличие от углерода, легирование сталей азотом увеличивает концентрацию электронов проводимости, т. е. усиливает металлический характер межатомного взаимодействия [16, 17]. Усиление металлического характера межатомных взаимодействий неподвижными атомами азота приводят к более сильному снижению подвижностей дислокаций в аустените, чем атомами углерода. По этой причине эффективность зернограничного упрочнения азотом выше, чем углеродом. Главным образом это связано с характером межатомных связей.

Усиленный азотом металлический характер межатомного взаимодействия является, как отмечалось выше, тем физическим фактором, который компенсирует охрупчивающее влияние межузельных атомов в твердом растворе внедрения [15].

Для аналитического определения механических характеристик наплавленных валиков при испытании по методу валиковой пробы ГОСТ 13585-68 использовали методику, представленную в работе [18]. Наплавку производили в пять слоев (толщина наплавки ≥ 12 мм) на пластину из термоупрочненной стали 45 толщиной 18 мм. Полученные расчетные показатели механических характеристик сварных швов для ПП-10Х18Г8АМ следующие: $\sigma_s \approx 1070$ МПа, $\sigma_m \approx 500$ МПа.

На рис. 1 представлены механические характеристики наиболее распространенных электродных материалов феррито-перлитного и аустенитного класса и новой порошковой проволоки.

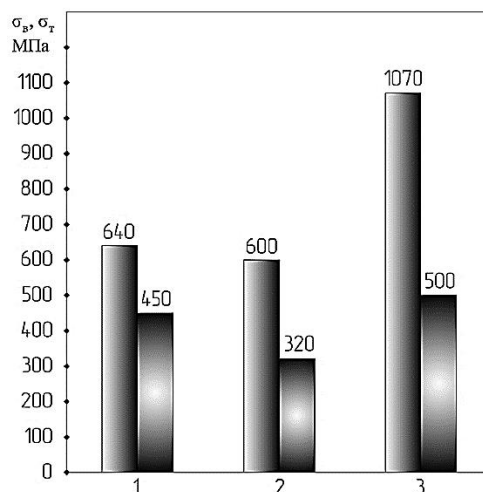


Рис. 1. Временное сопротивление и предел текучести соответственно:
1 – Св-10ГСМТ, 2 – Св-08Х20Н9Г7Т, 3 – ПП-10Х18Г8АМ

Как видно из рис. 1, разработанная порошковая проволока с системой легирования $Fe-Cr-Mn-Mo-N$ позволяет получить более высокие механические характеристики сварных швов по сравнению с используемыми в настоящее время сварочными проволоками феррито-перлитного или аустенитного класса.

Выводы

1. Проанализированы основные подходы к выбору сварочного материала при сварке высокопрочных среднелегированных сталей. Установлено, что имеющиеся подходы к выбору сварочного материала не в полной мере удовлетворяют возросшим требованиям к сварным соединениям по прочностным и эксплуатационным характеристикам, которые предъявляются в последнее время к изделиям ответственного назначения.

2. Использование при сварке высокопрочных среднелегированных сталей порошковой проволоки ПП-10Х18Г8АМ с содержанием азота до 0,3 % позволяет получить в металле шва аустенитную структуру с высокими прочностными характеристиками: $\sigma_s \approx 1070$ МПа, $\sigma_m \approx 500$ МПа.

3. Выяснено влияние азота на механические свойства наплавленного металла. Установлено, что легирование азотом усиливает металлический характер межатомного взаимодействия неподвижных атомов азота. Снижение подвижности дислокаций приводит к зернограничному упрочнению наплавленного металла.

Литература

1. Счастливцев В. М. Перекристаллизация сталей при сварочном нагреве / В. М. Счастливцев, В. М. Табатчикова, И. Л. Яковлева // Сварка и диагностика. – 2011 – № 3. – С. 8-13.

2. Грабин В. Ф. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей / В. Ф. Грабин, А. В. Денисенко. – Киев : Наук. думка, 1978. – 276 с.
3. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М. : Машиностроение, 1974. – 248 с.
4. Структура и вязкость зоны термического влияния сварных соединений высокопрочной стали / Т. И. Табатчикова, А. Д. Носов, С. Н. Гончаров [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2014. – Т. 115, № 12. – С. 1309-1317.
5. Гончаров С. Н. Холодные трещины при сварке высокопрочных среднелегированных сталей / С. Н. Гончаров, М. П. Шалимов. – Екатеринбург : УрФУ, 2012. – 96 с.
6. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
7. Лившиц Л. С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л. С. Лившиц, А. Н. Хакимов. – М. : Машиностроение, 1989. – 336 с.
8. Каховский Н. И. Электродуговая сварка сталей : справочник / Н. И. Каховский, В. Г. Фартушный, К. А. Ющенко. – Киев : Наукова думка, 1975. – 479 с.
9. Гуляев А. П. Новые низколегированные нержавеющие стали / А. П. Гуляев, Т. А. Жадан. – М. : Машиностроение, 1972. – 104 с.
10. Кирьян В. И. Проблемы использования новых сталей повышенной и высокой прочности в сварных конструкциях / В. И. Кирьян, Л. И. Миходуй // Автоматическая сварка. – 2002. – № 3. – С. 10-17.
11. Макара А. М. Сварка высокопрочных сталей / А. М. Макара, Н. А. Мосендз. – Киев : Техника, 1971. – 140 с.
12. Химическая неоднородность зоны сплавления соединений среднелегированных сталей с аустенитным металлом шва / А. М. Макара [и др.] // Автоматическая сварка. – 1976. – № 4. – С. 1-4.
13. Прогнозирование свойств металла шва повышенной прочности / Д. Л. Олсон, Э. Метцбауэр, С. Лиу [и др.] // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10. – С. 32-39.
14. Gavriljuk V. High Nitrogen Steels / V. Gavriljuk, H. Berns. – Berlin : Springer, 1999. – 378 p.
15. Березовская В. В. Система легирования высокоазотистых аустенитных сталей, структура, механические и коррозионные свойства // Инновации в материаловедении и металлургии : материалы I междунар. интерактив. науч.-практ. конф. (Екатеринбург, 13–19 дек. 2011 г.). – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2012. – Ч. 1. – С. 257-266.
16. Гаврилюк В. Г. Физические основы азотистых сталей. Перспективные материалы. Т. 2. Конструкционные материалы и методы управления их качеством / В. Г. Гаврилюк ; под ред. М. Меерсона. – ТГУ : МИСиС, 2007. 468 с.
17. Сагарадзе В. В. Упрочнение и свойства аустенитных сталей / В. В. Сагарадзе, А. И. Уваров. – Екатеринбург : РИО УрО РАН, 2013. – 720 с.
18. Structure and mechanical and corrosion properties of new high-nitrogen Cr-Mn-steels containing molybdenum / V. V. Berezovskaya, E. A. Merkushev, R. A. Savrai [et al.] // Russian Metallurgy (Metally). – 2013. – Vol. 2013, Iss. 11. – P. 380-388.

УДК 621.799

ВЫБОР ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ РАЙОНОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Е. А. Солопова, solopovae@yandex.ru

КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, г. Казань, Россия

***Аннотация.** Приводится сравнительный анализ различных вариантов технологий сварки и свойств сварных соединений технологического трубопровода из стали X70 API SL D = 406,4x28, эксплуатируемого в районах Западной Сибири и Крайнего Севера.*

***Ключевые слова:** технологический трубопровод, стыковое соединение, высокопрочная легированная сталь, сварка, термическая обработка.*

В настоящее время главной одной задачей нефтегазодобывающей отрасли является снижение потерь при добыче и транспортировке газа. Этим целям служат системы измерения количества газа, включающие в себя: блок фильтров, технологическую обвязку, запорной арматуры и систему автоматики.

Данная работа посвящена выбору варианта технологии сварки кольцевых стыков трубопроводов. Технологический трубопровод представляет собой сварную конструкцию, состоящую из труб разного диаметра, отводов, тройников и арматуры, соединенных между собой сварными швами и фланцевыми соединениями. Сложность изготовления данной конструкции состоит в том, что она должна надежно работать в условиях Западной Сибири и Крайнего Севера и рассчитана на высокие давления и минусовые температуры. К основным материалам и сварным швам этих систем предъявляются повышенные требования по прочности, пластичности, ударной вязкости и хладостойкости.

Основной трубопровод изготавливается из бесшовной, термически упрочненной высокопрочной трубы D = 406,4x28 из конструкционной легированной стали X70 API SL. Данная марка используется в системах измерения количества газа для закачивания в пласт Новопортовского нефтегазоконденсатного месторождения в технологических трубопроводах, работающих в условиях северной климатической зоны при температуре окружающей среды от -60 °С до +40 °С, температурой транспортируемой среды от +5 °С до +40 °С и рабочим давлением до 16 МПа. Трубы выпускаются диаметром от 10,75 до 80 дюймов, классом прочности не ниже K60. Трубы из X70 отличаются от нефтегазопроводных труб обычного

исполнения повышенной хладостойкостью и стойкостью к общей и язвенной коррозии, стойкостью к сульфидному коррозионному растрескиванию и образованию водородных трещин.

Табл. 1. Трубы бесшовные термически упрочненные

STEEL GRADE	SIZE (мм)	CHEMICAL COMPOSITION (Ladle Analysis), %									
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
X70	406,4x28	0,15	0,31	1,48	0,014	0,004	0,03	0,02	0,03	0,001	0,006
X70	323,9x25	0,15	0,31	1,45	0,015	0,003	0,04	0,01	0,03	0,001	0,005
STEEL GRADE	SIZE (мм)	MECHANICAL PROPERTIES					ELONGATION, %	C _э , %			
		ReL (MPa) YIELD STRENGTH		Rm (MPa) TENSILE STRENGTH							
X70	406,4x28	540/525		715/710		27/28	0,406				
X70	323,9x25	510/535		640/670		30/28	0,403				

В работе использовались следующие сварочные материалы:

1. Сварочная проволока сплошного сечения – ОК AristoRod 13.9 (ESAB) d = 1,2мм., AWS A5.28: ER80S-C. ТУ 1227-054-55224353-2009.
2. Сварочная проволока порошковая – ОК Tubrod 15.19 (ESAB) d = 1,2мм.
3. Сварочная проволока сплошного сечения – Св-08ГСМТ d = 1,2 мм ГОСТ 2246-70, ТУ 1227-016-50133500-2011.
4. Электроды – LB-52U d = 3,2мм E7016 по AWS A 5.1.
5. Электроды – ОК74.70 d = 3,2, d = 4,0мм E8018 по AWS A 5.5.
6. Смесь инертных и активных газов 75 % Ar + 25 % CO².
7. Смесь инертных и активных газов 82 % Ar + 18 % CO².
8. Аргон высшего сорта ГОСТ 10150-79.
9. Углекислый газ высшего сорта ГОСТ 8050-85.

Тип сварного соединения С-17 по ГОСТ 14771-76.

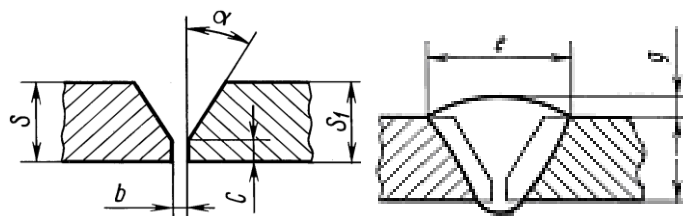


Рис.1. Форма разделки кромок и параметры сварного шва

Табл. 2. Геометрические размеры подготовки кромок и параметры шва

S = S1 мм	b, мм	c, мм	α , град, $\pm 2^\circ$	g, мм	e, мм	N Кол-во слоев	n Кол-во проходов
24,0-26,0	0-3,0	0-3,0	20	2,0 \pm 1,0	24 \pm 4	5	6
28,0-30,0					28 \pm 4	6	7

Для $S = 28$ мм количество слоев $N = 6$, 1 слой – корневой, 2-5 – заполняющие, 6 – облицовочный, варится в два прохода. Образцы сваривались по шести вариантам технологий: РД, РД + МП, РД + МПГ, МП, с предварительным подогревом, с термообработкой и без нее, с различными сварочными материалами.

1. РД. Все слои варятся ручной дуговой сваркой покрытыми электродами. Корневой слой LB-52 $d = 3,2$ мм, заполняющие и облицовочные слои ОК 74.70 $d = 3,2$ и $4,0$ мм с предварительным подогревом ($T = +100^{+30}$ °С) и последующим высоким отпуском ($T = +560$ °С, 60 мин.).

2. РД + МП. Корень шва варится ручной дуговой сваркой покрытыми электродами LB-52 $d = 3,2$ мм, заполнение и облицовка механизированной сваркой сварочной проволокой ОК Aristorod 13.09 $d = 1,2$ мм в смеси газов 82 % Ar + 18 % CO² с предварительным подогревом ($T = +100^{+30}$ °С) последующим высоким отпуском ($T = +560$ °С, 50 мин.).

3. РД + МПГ. Корень шва варится ручной дуговой сваркой покрытыми электродами LB-52 $d = 3,2$ мм, заполнение и облицовка механизированной сваркой сварочной проволокой ОК Tubrod 15.19 $d = 1,2$ мм в смеси газов 75 % Ar + 25 % CO² с предварительным подогревом ($T = +100^{+30}$ °С) последующим высоким отпуском ($T = +560$ °С, 50 мин.).

4. МП. Все слои варятся механизированной сваркой проволокой сплошного сечения ОК Aristorod 13.09 $d = 1,2$ мм в смеси газов 75 % Ar + 25 % CO² с предварительным подогревом ($T = +100^{+30}$ °С) последующим высоким отпуском ($T = +580$ °С, 60 мин.).

5. МП. Все слои варятся механизированной сваркой проволокой сплошного сечения ОК Aristorod 13.09 $d = 1,2$ мм в смеси газов 75 % Ar + 25 % CO² с предварительным подогревом ($T = +100^{+30}$ °С) без последующей термообработки.

6. МП. Все слои варятся механизированной сваркой проволокой сплошного сечения Св-08ГСМТ $d = 1,2$ мм в смеси газов 75 % Ar + 25 % CO² с предварительным подогревом ($T = +100^{+30}$ °С) последующим высоким отпуском ($T = +580$ °С, 60 мин.).

Результаты механических испытаний образцов сварных швов, полученных по варианту технологии № 2 (РД + МП).

Табл. 3. Статическое растяжение (образцы типа XVI ГОСТ 6996-66)

№ обр.	Временное сопротивление разрыву, σ_b , МПа	Место разрушения	Среднее значение, σ , МПа	Нормативное значение, σ_b , МПа
1	596,0	осн. металл	598,5	570
2	601,0	осн. металл		

Табл. 4. Статический изгиб

(образцы типа XXVII, ГОСТ 6996-66, $D = 2t$, угол изгиба не менее 60°)

№ обр.	Зона растяжения	Угол загиба	Результат испыт.
3	корень внутрь	120°	удовл.
4	корень наружу	120°	удовл.

Согласно ГОСТ 32569-2013 (П.12.2.3.) обязательной термообработке подлежат: стыковые соединения элементов из углеродистых сталей с толщиной стенки более 36 мм; сварные соединения штуцеров с трубами из углеродистых сталей при толщине трубы и штуцера более 36 и 25 мм соответственно; стыковые соединения из низколегированных марганцовистых и кремнемарганцовистых сталей с толщиной стенки более 30 мм и т. д. Согласно рекомендациям ОАО «ВНИИПТхимнефтеаппаратуры» от 06.08.2015 г., стыковые соединения технологических трубопроводов из сталей марок 10Г2ФБЮ, X70 API 5L с толщиной стенки свыше 30 мм и угловые соединения штуцеров с трубами толщиной соответственно более 30 и 25 мм должны подвергаться термической обработке по режиму высокого отпуска $T = +600-650^\circ\text{C}$, время выдержки 2,5 мин. на 1 мм сечения. Минимальная ширина зоны равномерного нагрева должна быть не менее двойной толщины стенки в каждую сторону от границы шва. Скорость нагрева при T свыше 300°C не более $150^\circ\text{C}/\text{час}$. Скорость охлаждения до $T = 300^\circ\text{C}$ не более $150^\circ\text{C}/\text{час}$, далее – под слоем теплоизоляции.

Для этих целей была приобретена индукционная установка УИИТ-50-2,4.

Технические данные:

Мощность установки, кВт	50
Номинальное напряжение питающей трехфазной сети, В	380
Частота питающей сети, Гц	50
Напряжение на выходе установки (max), В	300
Номинальная выходная частота установки, кГц	2,4

Коэффициент полезного действия (не менее), %	93
Длина выходного кабеля, м	22
Охлаждение воздушное.	

На трубу D = 406,4 мм наматывалось по 10 и 11 витков с каждой стороны шва. I = 1200-1300А. U = 50-55В. Сечение провода 95 кв. мм.

Табл. 5. Ударный изгиб (образцы типа IX, ГОСТ 6996-66)

№ обр.	Место концентратора	Ударная вязкость, KCV + 20 Дж/см ²	№ обр.	Место концентратора	Ударная вязкость KCV - 60 Дж/см ²
5	По центру шва	126	8	по центру шва	49
			9		51
6		133	10	По ЗТВ	33
			11		188
7		122	12		196
			13		192

Табл. 6. Твердость HV10

Основной металл	ЗТВ	Металл шва	ЗТВ	Основной металл
180;181;185	209;210;212	209;207;212	216;210;207	190;187;185
176;183;187	212;215;219	213;206;210	215;213;212	186;183;180

Все сварные швы подвергались следующим видам контроля: ВИК – 100 %, РК – 100 %; механическим испытаниям: на статическое растяжение – 2 образца, на статический изгиб – 2 образца, ударный изгиб – 12 образцов (при T = +20 °C – 6 образцов, при T = -60 °C – 6 образцов), ударная вязкость определялась на образцах с V-образным надрезом по сварному шву и зоне термического влияния, твердость HV10 определялась на макрошлифе на 1 образце. Механические испытания проводились на базе испытательной лаборатории «Спектр». Образцы сваривались на производственной базе ЗАО НИЦ «Инкомсистем».

В результате проведенных испытаний можно сделать вывод: наилучшие результаты по ударной вязкости при минусовых температурах показал вариант технологии № 1(РД) и № 2 (РД + МП), наименьшую – вариант № 6 (МП) с проволокой Св-08ГСМТ, остальные варианты показали результаты удовлетворяющие требованиям нормативной документации.

Так как ручная дуговая сварка имеет низкую производительность и большой объем слесарных работ по послойной зачистке швов, было принято

решение использовать для сварки технологических трубопроводов комбинированную сварку: корень шва варить ручной дуговой сваркой покрытыми электродами LB-52 $d = 3,2$ мм, заполнение и облицовку механизированной сваркой сварочной проволокой ОК Aristorod 13.09 $d = 1,2$ мм в смеси газов 82 % Ar + 18 % CO² с предварительным подогревом ($T = +100^{+30}$ °С) и последующим высоким отпуском ($T = +560$ °С, 50 мин.). Результаты работы были использованы при аттестации технологии согласно РД 03-615-03 и изготовления системы измерения количества газа для закачивания в пласт Новопортовского нефтегазоконденсатного месторождения для ООО «Газпром Новый порт».

Литература

1. СТО 00220368-013-2009. Сварка сосудов, аппаратов и трубопроводов из углеродистых и низколегированных сталей.
2. ГОСТ 32569-2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах.
3. API Sec. 5L. Технические условия на трубы для трубопроводов / Американский нефтяной институт. – 2004. – Изд. № 43.
4. СТП 26.260.486-2005. Каталог аналогов импортных и отечественных основных и сварочных материалов, применяемых при изготовлении сосудов, аппаратов и трубопроводов, подведомственных Ростехнадзору.
5. ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитных газах.
6. Солопова Е. А. Исследование строения и свойств сварных соединений технологических трубопроводов для Северной климатической зоны / Е. А. Солопова // Наука в движении: от отражения к созданию реальности : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции / под общей ред. М. Ш. Гарифуллиной. – М. : Издательство «Перо», 2016. – С. 95-100.

УДК 621.791

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ В ТОНКОЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Р. У. Хайбрахманов, redon15@mail.ruЮ. С. Коробов, д-р техн. наук, yukorobov@gmail.com

УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

***Аннотация.** Высокая конкуренция в области машиностроения требует изготовления облегченных тонколистовых конструкций из высокопрочных сталей с обеспечением геометрии определенной точности. Обеспечение заданной геометрии достижимо при совершенствовании мер снижения остаточных деформаций. Поэтому целью исследования является снижение деформации на основе анализа влияния жесткости прижима на напряженно-деформированное состояние сборки с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов. Результатом исследования является модель прижима, позволяющая регулировать уровень остаточных напряжений и деформаций, подтвержденных экспериментальным путем.*

***Ключевые слова:** компьютерное моделирование сварки, сварка тонколистовых металлов, сварка высокопрочных сталей, математические методы компьютерного анализа, метод конечных элементов, остаточные перемещения, напряжения после сварки, деформации после сварки.*

Введение

Сварка тонколистовых деталей из высокопрочной стали мартенситно-бейнитного класса (полотнищ, балок, обечаек) сопровождается изменением геометрии сборки после сварки. Это связано с потерей устойчивости конструкции ввиду малой толщины деталей и возникающих напряжений в сварных соединениях вследствие теплового нагружения деталей сварочной дугой и структурных превращений, сопровождаемых изменением объема получаемой структуры. Распространенными методами по снижению деформации являются: обеспечение жесткости за счет фиксации свариваемых деталей, выбор последовательности сборки, применение отрицательного прогиба, варьирование погонной энергии сварочного источника и др. Количественная оценка эффективности этих методов может базироваться на САЕ-анализе сварных соединений.

Целью работы является анализ деформаций при изменении жесткости фиксации свариваемых деталей.

Методы и материалы

Исследованы деформации и напряжения в тонкостенной обечайке из стали 30ХГСА; соединение продольного стыка произведено аргонодуговой

сваркой неплавящимся электродом (рис. 1), для которой $R/\delta > 20$ (R – радиус обечайки, $\delta = 3$ мм – толщина стенки). При этом соотношении можно пренебрегать влиянием изгибающего момента, напряжениями от изгиба и кручения [1].

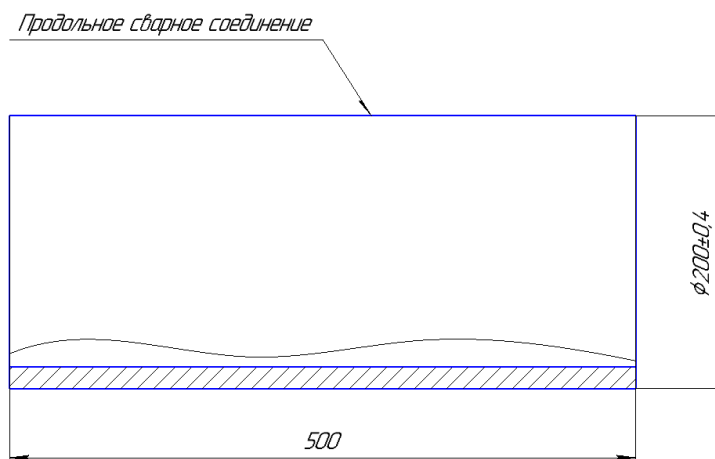


Рис. 1. Эскиз изделия

Это упрощение позволяет заменить в расчете обечайку с продольным швом на пластину со стыковым соединением, рис. 2 [2-4]. Принята схема нагрева объемным, подвижным источником тепла (погонная энергия 500 Дж/мм). Схема нагружения включает усилия от тепловых нагрузок процесса сварки и от четырех прижимов приспособления, площадь каждого 100 мм² (рис. 1). Рассмотрены случаи усилий прижатия (P), Н: $P = 0$ – соответствует свободному перемещению; $P = 5000$ – соответствует, согласно опытным данным, жесткому закреплению, при котором усилие от теплового расширения меньше силы трения от прижима, коэффициент трения 0,2; $0 < P < 5000$ – варьируемая нагрузка. Расчеты выполнены в программном комплексе SYSWELD методом конечных элементов.² Схема разбиения области соответствует тепловому полю сварного соединения (рис. 3).

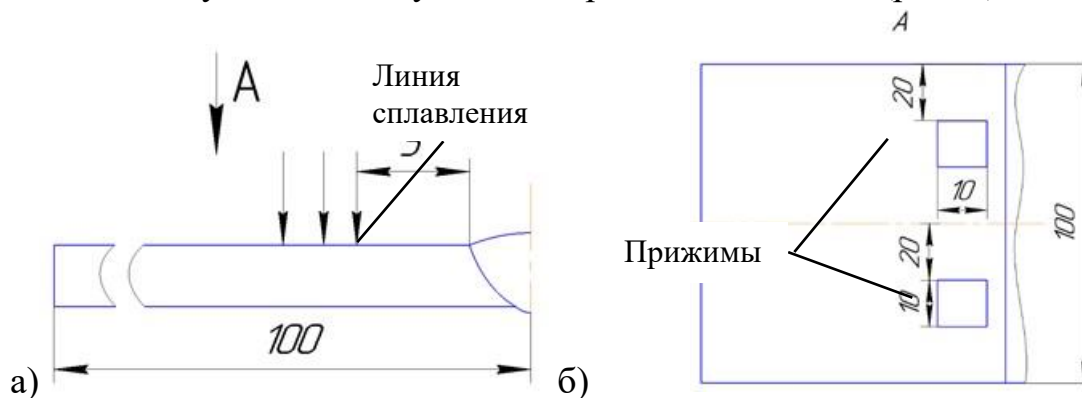


Рис. 2. Схема нагружения пластины со стыковым соединением

² В исследовании принимал участие Г. А. Биленко

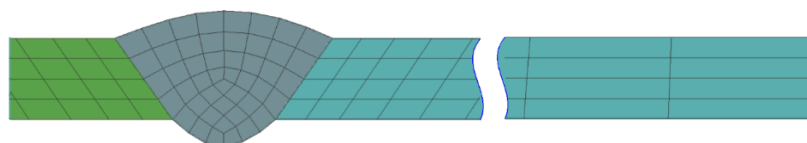


Рис. 3. Сетка элементов, принятая в расчетах

Начальная температура пластин $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Структурные превращения соответствуют термокинетической диаграмме (рис. 4).

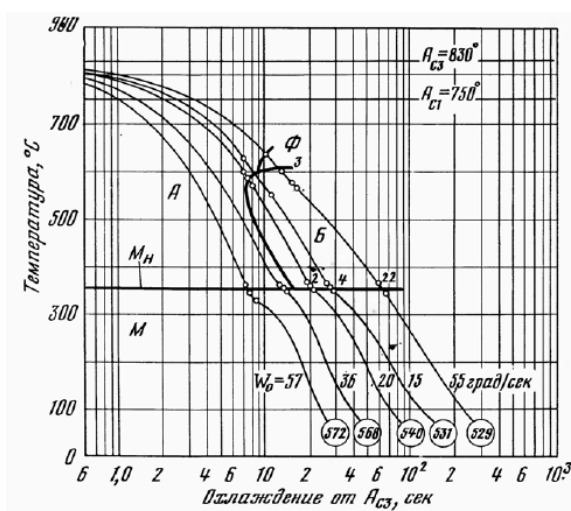


Рис. 4. Диаграмма превращения аустенита при непрерывном охлаждении в условиях термических циклов сварки для стали 30ХГСА [5]

Контроль образцов на наличие трещин выполнен рентгенографическим методом. Для проверки расчетов проведены испытания пластин размером согласно рис. 2 на статический изгиб и растяжение по ГОСТ 6996-66.

Результаты

В зависимости от усилия нагрузки максимальные расчетные деформации наблюдались на разных участках (рис. 5).

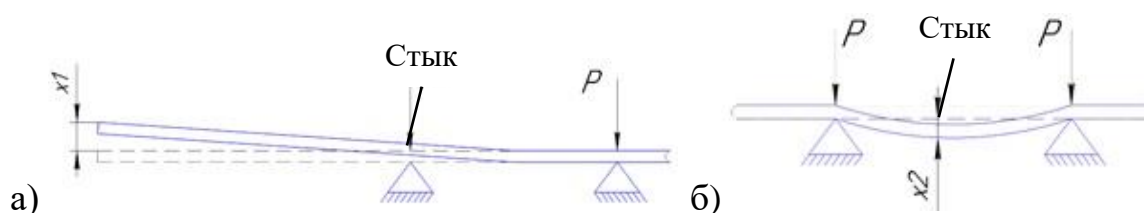


Рис. 5. Участки максимальных деформаций: а – варьируемая нагрузка, $P < 5000\text{H}$; б – жесткое закрепление, $P = 5000\text{H}$

Максимальные напряжения выявлены на линии сплавления в области перехода от основного металла к металлу шва (рис. 6). Трещин в сварных соединениях не выявлено при всех условиях нагружения. Деформации при сварке в свободном состоянии составили 0,55 мм, с применением прижима – 0,45 мм, при жестком закреплении – 0,4 мм.

Результаты испытаний показали, что при жестком закреплении механические свойства сварного соединения снижаются (рис. 7).

Обсуждение

Расчет показал, что существует такое усилие $P_{кр}$, при котором область максимальных деформации меняет свою локализацию. При слишком большом усилии прижатия сила трения в прижиме превысит усилие от теплового расширения, что соответствует жесткому закреплению пластины между прижимами. В этом случае напряжения сжатия, вызванные сваркой, превысят критические напряжения, определяемые по уравнению [6]:

$$\sigma_{сж} > \sigma_{кр} = k\pi^2 E(s/b)^2 / (12(1-\mu^2)),$$

где k – коэффициент, зависящий от соотношения сторон пластин и характера закрепления ее кромок; E – модуль Юнга; s – толщина пластины; μ – коэффициент Пуассона, b – ширина пластин.

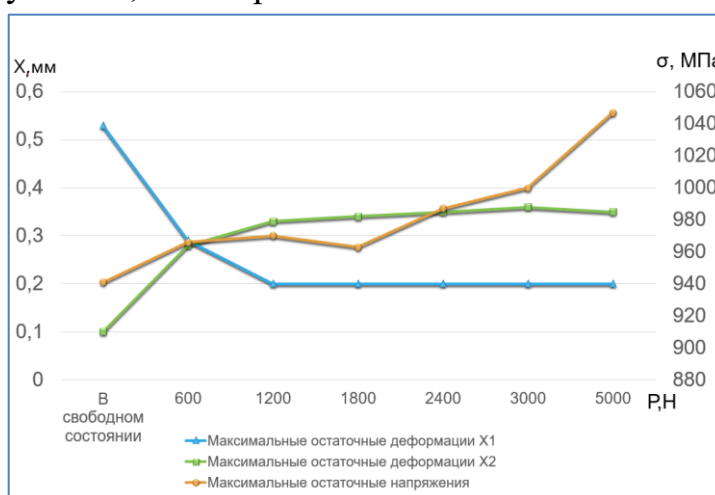


Рис. 6. Изменение максимальных остаточных напряжений и деформаций в зависимости от усилия прижима (P)

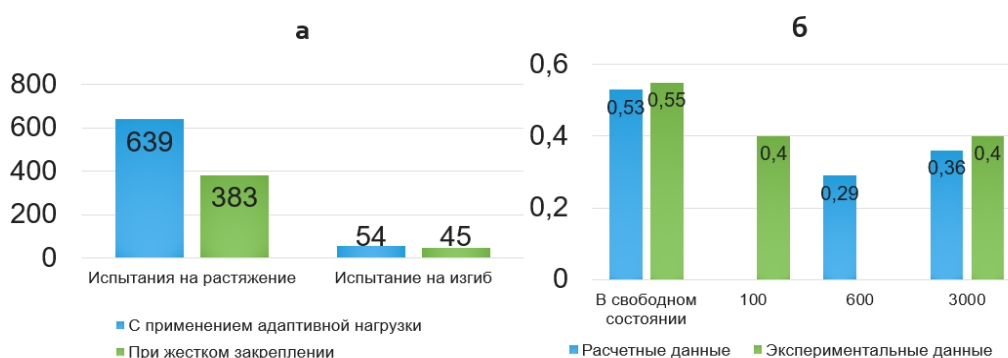


Рис. 7. Результаты испытаний: а – напряжения разрыва, МПа, и угол загиба, град; б – сравнение экспериментальных и рассчитанных деформаций, мм, при различных усилиях в зажимах, Н

Это приводит к потере устойчивости пластины на участке между прижимами. При усилии прижима меньшем усилия жесткого закрепления, напряжения от тепловых деформаций релаксируются в линейные деформации, что приводит к снижению напряжений в сварных соединениях и в околошовной зоне, что позволяет ограничить деформации детали во время сварки.

Механические испытания показали, что при нежестком закреплении прочность и пластичность сварного соединения увеличена в сравнении с жестким закреплением, вероятно, вследствие благоприятных условий кристаллизации металла шва.

Полученные результаты достаточны для подготовки технического задания на проектирование сборочно-сварочного приспособления фиксации тонкостенной обечайки.

Выводы

Разработана модель деформации тонколистовой конструкции из высокопрочной стали при сварке путем компьютерных расчетов в SYSWELD. Использование нежестких прижимов привело к снижению деформации пластин на 45 % в сравнении со сваркой в свободном состоянии. При этом прочность сварного соединения на растяжение увеличена на 67 %, угол загиба – на 20 %, в сравнении с жестким закреплением, вследствие благоприятных условий кристаллизации металла шва.

Расхождение между расчетами и экспериментальными данными не превысило 11 %.

Выполненные расчеты можно применить для подготовки технического задания на проектирование сборочно-сварочного приспособления фиксации тонкостенной обечайки.

Литература

1. Серенко А. Н. Расчет сварных соединений и конструкций. Примеры и задачи / А. Н. Серенко, М. Н. Крумбольдт, К. В. Багрянский. – Киев : Изд-во «Вища школа», 1977. – 336 с.
2. Николаев Г. А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. – М. : Высшая школа, 1971. – 760 с.
3. Теория сварочных процессов / под ред. В. М. Неровного. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 752 с.
4. Феклистов С. И. Моделирование остаточных сварочных деформаций и напряжений. – ГНЦ ЦНИИТМАШ, 2003. – 122 с.
5. Шоршоров М. Х. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке. Атлас / М. Х. Шоршоров, В. В. Белов. – М. : Наука, 1972. – 219 с.

6. Гатовский К. М. Теория сварочных деформаций и напряжений / К. М. Гатовский, В. А. Кархин. – Л. : ЛКИ, 1980. – 330 с.

УДК 621.791

ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕМОНТНОЙ СВАРКЕ

А. А. Чудинов, st@udgz.ru

ООО «Композит», г. Нижний Тагил, Россия

Аннотация. На ремонтную сварку горного и металлургического оборудования, как правило, выделяется немного времени, чтобы уменьшить его простой и, связанные с ним, потери объема производства продукции. Рассмотрены решения, направленные на ускорение ремонтной сварки без ущерба ее качеству.

Ключевые слова: сварка, ремонт, инновации.

Введение

Горно-металлургическое оборудование, как правило, содержит дорогостоящие части большой массы, повреждаемыми трещинами различного происхождения. Их замена сопряжена с большими затратами на приобретение новых, демонтаж с монтажом, и потерями объемов основного производства во время ремонтного простоя. Это побуждает предприятия прибегать к ремонтной сварке трещин. Трудность состоит в том, что на нее отводится ограниченное время. Статья посвящается минимизации числа и времени выполнения технологических операций, при обеспечении необходимых требований к качеству ремонтной сварки.

Какие трещины необходимо устранять сваркой

Трещины, существенно уменьшающие рабочее сечение, нуждаются в сварке, во избежание разрушений от сопутствующего роста напряжений. Даже небольшие трещины в районе конструктивных концентраторов напряжений (отверстий, галтелей...), согласно заключению от 1971 г. Комиссий № 9 и 10 Международного института сварки, могут инициировать хрупкие разрушения, происходящие при напряжениях ниже предела

прочности, поэтому так же подлежат заварке. При этом другие трещины, не подпадающие под перечисленные характеристики, могут выдерживать длительную эксплуатацию без существенного развития. Поэтому излишние требования к заварке трещин могут причинять больший вред, чем не удаленные трещины [1, 2].

Разделка трещин

По трудоемкости разделка трещин может быть сопоставима с их заваркой. При этом актуальна проблема полного их удаления. Предварительное выявление трещин дефектоскопией не гарантирует, что они будут полностью удалены. Повторный контроль существенно замедляет работы. В этом отношении имеет преимущество воздушно-дуговая (ВД) разделка, при которой трещины хорошо просматриваются и вероятность, что они будут удалены не полностью, мала. Многолетнее использование ВД процесса при разделке трещин в ходе ремонтной сварки ответственных изделий (цилиндры мощных прессов, детали горно-обогачительного оборудования) свидетельствует об эффективности его применения [3, 4].

Заполнение разделок

Сварка разделок начинается с наложения корневых валиков, в которых часто образуются поры. Для их предупреждения сварку полуавтоматом заменяют сваркой покрытыми электродами. Наличие шлаковой защиты, способствующей предупреждению пор, имеет негативную сторону. Образующаяся шлаковая корка плохо удаляется из узких корневых разделок и, если оказывается не полностью удаленной, сама становится причиной порообразования. Для облегчения удаления шлаковой корки из узких разделок в корнях швов целесообразно применять электроды ТМУ-21У. Их стоимость выше, но вызываемое ими удорожание процесса сварки компенсируется сокращением затрат на устранение пористых швов [5].

Наиболее производительным при ремонтной сварке является применение сварочных полуавтоматов. За 8-часовую смену полуавтоматом наплавляется до 40 кг металла, тогда как вручную электродами – около 7 кг. Однако о применение полуавтоматов «на выездах», т. е. при ремонтах, до конца прошлого столетия не сообщалось. Впервые ее выполнил ООО «Композит» в 1999 г. при ремонте зумпфа на Высокогорском ГОКе, а затем в 2003 г. отдел главного механика МК «Азовсталь» (Мариуполь) при сварке кожуха доменной печи. Полуавтоматами удается решать вопросы не только сокращения времени ремонта (за счет более высокой производительности и устранения перерывов на удаление шлаковой корки), но и уменьшения

остаточных напряжений и деформаций, благодаря более узкой зоне термического влияния, образующейся при полуавтоматической сварке [6, 7].

Проковка швов и подогрев при сварке

Подогрев при сварке является универсальным средством предупреждения дефектов (пор, трещин, подрезов...) при сварке. Кроме того, он благоприятно сказывается на последующей работоспособности сварных соединений. Это связывают с устранением (уменьшением) сварочных напряжений и хрупких закалочных структур. Но подогрев дает существенное замедление сварочных работ, делает условия труда сварщиков более тяжелыми. Кроме того, его выполнение бывает затруднительно по техническим или организационным причинам. Известно, что альтернативой подогреву является проковка сварных швов. При этом имеются возможности выборочного ее проведения с целью уменьшения трудоемкости. Например, при заполнении широких разделок проковываются лишь средние валики [6]. Задача такой проковки состоит не в полном устранении сварочных напряжений, а в снижении их пиковых значений, ответственных за зарождение трещин.

Оптимизация конструкции в ходе ремонтной сварки

Расположение трещин в ремонтируемом изделии может указывать на ошибки в его проектировании. Поэтому ремонтная сварка нередко сочетается с одновременной оптимизацией его конструкции. Примеры таких решений приведены в работах [7, 8]. Контейнер-держатель (сталь 30Л) прессы усилием 3150 т прикрепляется к станине прессы посредством двух приливов с двумя отверстиями в каждом для болтов. В результате многолетней эксплуатации верхний прилив с каждой стороны получил по одной трещине, которые были отремонтированы сваркой. Через непродолжительный срок эксплуатации в ремонтных швах появились трещины. Внешний вид сварочного шва с трещиной (рис. 1), позволяет отметить, что им не обеспечен, предусмотренный чертежом, радиус (R) 100 мм. С целью оценки влияния этого концентратора на величину рабочих напряжений проведено моделирование в программе SLDWORKS. В качестве рабочей нагрузки принято воздействие продольной силы 31500000 Н (3150 т.с) на цилиндрическую часть контейнер-держателя, с



Рис. 1. Сварочный шов с трещиной.

образованием объемного напряженного состояния. Оценка прочности выполнена по условию Мизеса. В результате установлено, что напряжение при радиусе (R) 100 мм в 2,3 раза ниже предела текучести стали 30Л. Уменьшение радиуса до $R = 10$, т. е. как на рис. 1, дало увеличение напряжений свыше предела текучести, что и привело к образованию трещин.

Выбор сварочных выпрямителей

Известно, что дуга от диодных выпрямителей дает меньшее разбрызгивание и более устойчива, чем дуга от тиристорных выпрямителей. Но наилучшие условия сварки обеспечивают инверторные источники питания. В них предусматривается задержка в снижении напряжения холостого хода при коротком замыкании в начале сварки, что облегчает возбуждение дуги. Увеличение тока, при достижении напряжением на дуге недопустимо малого значения, предупреждает «примерзание» электрода и облегчает сварку короткой дугой. При использовании инверторных источников питания от сварщиков требуется меньшее индивидуальное мастерство, что позволяет шире привлекать молодых рабочих.

Заключение

Изложенные в работе инновационные подходы дают существенное сокращение объемов ремонтной сварки и затрат времени на ее проведение. Не все выявленные трещины целесообразно устранять ремонтной сваркой, ибо вред от нее может оказаться больше, чем от незаваренной трещины. Воздушно-дуговая разделка трещин не только высокопроизводительна, но и одновременно позволяет контролировать полноту их удаления. Применение электродов ТМУ-21У с легко отделяющимся шлаком и сварочных полуавтоматов, замена подогрева проковкой швов являются эффективными мерами по ускорению ремонтной сварки. Устранение концентраторов напряжений в ходе ремонтной сварки способно вызвать омолаживающий эффект и повысить надежность ремонтируемого изделия. В условиях текущего дефицита квалифицированных сварщиков применение инверторных источников питания позволяет привлекать для работы молодые кадры, не опасаясь ухудшения качества сварных соединений.

Литература

1. Панов В. И. Методологические подходы решения проблемы технологической прочности сварных крупногабаритных конструкций // Сварочное производство. – 1993. – № 11-12. – С. 27-29.
2. Коновалов Н. Н. Требования к качеству сварных соединений // Сварочное производство. – 2004. – № 11. – С. 45-46.

3. Михайлов И. Д. Продление срока службы цилиндров гидравлических прессов / И. Д. Михайлов, В. А. Коротков // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2017. – № 2. – С. 8-13.
4. Коротков В. А. Инновационные технологии ремонтного восстановления и продления срока службы деталей и узлов горно-обогатительного оборудования / В. А. Коротков, А. Г. Липатов, А. М. Веснин // Горный журнал. – 2015. – № 8. – С. 83-87.
5. Коротков В. А. Ремонтная сварка пресса SKV 6000 / В. А. Коротков, И. Д. Михайлов, В. И. Панов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2009. – № 2. – С. 4-7.
6. Коротков В. А. Из опыта ремонтной сварки горно-металлургического оборудования / В.А. Коротков, И. Д. Михайлов // Сварочное производство. – 2011. – № 7. – С. 41-48.
7. Коротков В. А. Ремонтная сварка траверсы пресса / В. А. Коротков, А. С. Зотов // Сварка и диагностика. – 2008. – № 5. – С. 26-27.
8. Коротков В. А. Проактивные ремонты в металлургической отрасли // Известия вузов. Черная металлургия. – 2014. – № 8. – С. 18-24.

УДК 621.791.92

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ДРОБИЛОК

А. М. Веснин, st@udgz.ru

ООО «Композит», г. Нижний Тагил, Россия

Аннотация. Восстановление износа приваркой листового пакета и его ежегодной облицовкой твердой наплавкой позволило оставить дорогостоящую траверзу дробилки крупного дробления на третий нормативный срок эксплуатации. Упрочнение контактного пояса вала дробилки среднего дробления легированной наплавкой и плазменной закалкой исключило его быстрое смятие при эксплуатации и многократно сократило частоту ремонтов.

Ключевые слова: дробилка, наплавка, износостойкость.

Введение

Дробилки относятся к дорогостоящим изделиям тяжелого машиностроения, срок эксплуатации которых может исчисляться десятилетиями. Их замена сопряжена с большими капитальными затратами, поэтому продление срока службы дробилок, представляет актуальную задачу. Настоящая статья посвящена технологиям восстановления и упрочнения некоторых деталей дробилок.

Траверзы дробилок крупного дробления

На Качканарском ГОКе через две конусные дробилки крупного дробления типа ККД проходит весь объем добытой руды, поэтому их даже небольшой простой неотвратимо уменьшает показатели выработки всего комбината. Траверза, располагающаяся в верхней части дробилки, удерживает верхний конец дробящего конуса. При этом она изнашивается ссыпавшей сверху в дробилку рудой. Износом уменьшается сечение траверзы, что может вызвать ее поломку.



а)



б)

Рис. 1. Наплавка траверзы дробилки крупного дробления (а), и контактного пояса на валу дробилки среднего дробления (б)

В конце 90-х гг. 20 в. траверзы на обеих дробилках Качканарского ГОКа получили значительный износ, чтобы замедлить изнашивание приступили к

их облицовке износостойкой наплавкой (рис. 1) во время ежегодных капитальных ремонтов. Было установлено, что годовая эксплуатация изнашивает не только наплавленный слой, но и уменьшает толщину траверз. Таким образом, к середине «нулевых» годов возникла потребность в восстановлении износа траверзы близкого по величине к одному метру. Наплавить такую массу металла во время капитального ремонта не представлялось возможным, поэтому для восстановления был выбран метод приварки «листовых пакетов» [1]. К изношенной поверхности торцами привариваются листы по длине соответствующие высоте траверзы, а по ширине – величине износа (~1 м). Затем каждый лист сваривается с предыдущим таким же листом по трем свободным сторонам, для чего на листах, на всех его четырех сторонах, предварительно выполняется скос кромок. Вертикальная поверхность приваренного листового пакета наплавляется износостойким материалом. Восстановленные таким образом траверзы эксплуатировались до последнего времени с ежегодной наплавкой изношенных поверхностей твердым сплавом во время капитальных ремонтов. Наконец, возникла потребность в повторной приварке листового пакета. Это было сделано в 2018 г. В результате дорогостоящая деталь дробилки (траверза) была оставлена на третий нормативный срок эксплуатации.

Конуса дробилок среднего дробления

На Качканарском ГОКе имелось 29 секций дробилок среднего дробления, по три дробилки в каждой секции. В каждой секции руда, переходя из одной дробилки в другую, уменьшает размер фракции. С уменьшением фракции увеличивается нагрузка на рабочие элементы дробилок, в том числе, на сопряжение корпуса конуса с надеваемой на него сменной дробящей броней из износостойкой стали Гадфильда 110Г13Л. В 90-е гг. интенсивность изнашивания корпусов конусов дробилок по месту (поясу) контакта с броней была большой, и ежегодно наплавкой восстанавливалось около половины (40-50 шт.) валов, из числа находящихся в работе, что вызывало напряженность в своевременной замене дробящих броней.

Причиной быстрого износа являлась низкая твердость наплавки НВ120-140, выполняемой проволокой Св-08А под флюсом. Эффективными средствами увеличения износостойкости являются применение легированных материалов и, ставшей в «нулевых» годах более доступной, плазменная закалка [2-4]. В связи с этим, вместо наплавки проволокой Св-

08А (тип стали 08) применили легированную проволоку ПП-СП10, тип стали 08ГС (табл. 1), что увеличило твердость наплавки до НВ 180-200, и примерно вдвое сократило число наплавов, до ~20 шт/год. Следующий этап упрочнения долговечности контактных поверхностей конусных валов заключался в применении легированной наплавочной проволоки ПП-14ГС и финишной (после обточки) плазменной закалки установкой УДГЗ-200 (<http://1m63.ru/katalog-stankov/udgz200/>). Значения твердости приведены в табл. 1. По ней можно видеть, что твердость наплавки проволокой Св-08А существенно (в 1,77 раза) уступает в твердости основному металлу конуса. Вероятно, это предопределяло ее смятие в начальный период работы, образование зазора, вызывающего ударные нагрузки, ускоряющие изнашивание и становящиеся причиной частых наплавов контактного пояса. Наплавка ПП-14ГС делает твердость поверхности контактного пояса больше (на 17 %), чем у основного металла, а дополнительная плазменная закалка увеличивает это преимущество до 1,52 раза. В результате износ смятием контактного пояса при работе дробилки был устранен, а частота восстановительных наплавов уменьшена до 1-3 наплавов в год.

Табл. 1. Значения твердости контактного пояса конусного вала дробилки

Состояние контактной поверхности	Твердость
Основной металл конусного вала	НВ 220-240
Наплавка проволокой Св-08А	НВ 120-140
Наплавка проволокой 14ГСТ	НВ 260-280
Плазменная закалка наплавки 14ГСТ	НВ 340-360

Литература

1. Коротков В. А. Восстановление деталей горного оборудования / В. А. Коротков, В. А. Замотин // Горный журнал. – 2001. – № 8. – С. 53-56.
2. Коротков В. А. Проактивные ремонты в металлургической отрасли // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2014. – № 8. – С. 18-24.
3. Коротков В. А. Плазменная закалка слоя наплавки 30ХГСА // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – № 5. – С. 19-21.
4. Коротков В. А. Исследование износостойкости углеродистых сталей, упрочненных плазменной закалкой / В. А. Коротков, М. В. Злоказов // Трение и износ. – 2014. – Т. 35, № 2. – С. 178-182.

УДК 621.785.5 + 621.791.92 + 658.588.8

ПРИМЕРЫ ОМОЛАЖИВАЮЩИХ РЕМОНТОВ

В. Н. Голенков, st@udgz.ru

ООО «Композит», г. Нижний Тагил, Россия

Аннотация. Рассмотрено применение наплавки и плазменной закалки отверстий в корпусах оборудования прямо по месту его работы без демонтажа с увеличением срока службы, восстановление трубоправильной машины, продление срока службы крановых колес из трудно свариваемой стали 65Г.

Ключевые слова: наплавка, ремонт, инновации.

Введение

Во время ремонтов имеется возможность выявлять детали и узлы, наиболее часто выходящие из строя, и проводить их модернизацию, что конструкторы называют «доводкой» машин и оборудования [1]. В настоящей работе рассмотрены примеры такой модернизации с применением современных технологий упрочнения и восстановления рабочих поверхностей.

Восстановление отверстий в корпусах по месту эксплуатации

Корпуса оборудования обычно выходят из строя из-за износа расположенных в них отверстий, на стенках которых происходит концентрация всей воспринимаемой корпусом нагрузки. Чтобы избежать демонтажа, транспортировки (как правило, массивных и «негабаритных») корпусов к месту ремонта и обратно, монтажа отремонтированного корпуса, разработан аппарат «Supercombinata SC/60». С его помощью прямо по месту эксплуатации оборудования выполняется расточка изношенных отверстий, их наплавка и окончательной механообработка. Разработчиком «Supercombinata SC/60» предусмотрена наплавка низкоуглеродистой сварочной проволокой, которая создает наплавленный слой небольшой твердости НВ140. Она благоприятна последующей обработке резцом, но уступает твердости и износостойкости основного металла корпусов, изготавливаемых, как правило, из стали типа 35Л с твердостью НВ180. Было установлено, что закалка установкой УДГЗ-200 (1m63.ru/katalog-stankov/udgz200) увеличивает износостойкость низкоуглеродистой стали до уровня среднеуглеродистой [2], что стало основанием к ее применению на восстановленных отверстиях в корпусах экскаваторов, шахтных буровых установок, погрузочно-доставочных машин, самосвалов, прокатных станов. Благодаря плазменной закалке срок службы посадочных отверстий после восстановления поднялся до изначального уровня.

Ремонт трубоправильной машины

После длительной эксплуатации трубоправильной машины типа BRONX в ходе ее работы стала наблюдаться повышенная вибрация, и, как следствие, появление на трубах бракуемых дефектов: эллипсности, вмятин. Машина состоит из корпуса и трех пар (верхние – нижние) роликов, через которые проходят подлежащие правке трубы. Ролики в подшипниковых опорах устанавливаются на пальцах, которые помещаются в отверстиях корпуса машины. Разборка машины показала, что зазоры посадок пальцев в корпусе достигают значительной величины 0,80 мм, что стало причиной брака. Отсюда было принято решение о минимизации зазоров.

Восстановление износа, чаще всего, производится наплавкой. В данном случае корпус машины выполнен из серого чугуна (трудно свариваемого материала), что делает наплавку отверстий нецелесообразной. Поэтому их расточили переносной установкой «Supercombinata SC/60», наплавку выполнили пальцам трубоправильной машины. В ходе расточки было обнаружено, что отверстия имеют односторонний износ, с учетом чего, ремонтным размером отверстия был принят размер Ø251H7 (0,00...+0,05 мм), что увеличило площадь контакта с пальцами (и запас прочности) в 1,05 раза. Для наплавки пальцев применили проволоку, обеспечивающую в наплавленном слое более высокую твердость (HB240), чем твердость основного металла пальцев (HB180), что увеличило контактную прочность пальцев в 1,33 раза (HB240/HB180). В совокупности с увеличением диаметра отверстий контактная прочность отремонтированного сопряжения увеличена в $1,33 \times 1,05 = 1,4$ раза.

Инновационное восстановление крановых колес

До 70-х гг. 20 в. крановые колеса изготавливались из углеродистой стали типа 45 с невысокой твердостью HB180-220, а после изнашивания их наплавляли проволокой Нп-30ХГСА, что увеличивало их твердость до HB240-260 и, соответственно, срок службы. В 70-ые гг. крановые колеса начали изготавливать из легированной стали 65Г и подвергать закалке на твердость HB350, что увеличило их срок службы по сравнению с колесами из углеродистой стали 50 без термического упрочнения. Однако наплавка колес из стали 65Г проволокой Нп-30ХГСА сопровождалась появлением трещин, и от проведения ее отказались. Наплавка же «мягкой» проволокой Св-08А трещин не давала, но срок службы колес резко сокращался. Таким образом, износостойкая наплавка колес из стали 65Г некоторое время оставалась неосвоенной. Проблему износостойкой наплавки крановых колес удалось

решить ООО «Композит» и усовершенствовать ее последующей плазменной закалкой, что существенно повысило эффективность применения крановых колес из износостойкой стали 65Г [3, 4].

Заключение

В работе рассмотрено применение наплавки и плазменной закалки отверстий в корпусах оборудования прямо по месту его работы без демонтажа с увеличением срока службы, восстановление с упрочнением крановых колес из трудно свариваемой стали 65Г.

Литература

1. Орлов П. И. Основы конструирования : справ.-метод. пособие : в 2-х кн. – Кн. 1 / под ред. П. Н. Учаева. – М. : Машиностроение, 1988. – 560с.
2. Коротков В. А. Износостойкость углеродистых сталей с различными видами упрочнения // Трение и износ. – 2015. – № 2. – С. 196-200.
3. Ананьев С. П. Совершенствование наплавки крановых колес / С. П. Ананьев, В. А. Коротков // Сварка и диагностика. – 2014. – № 5. – С. 40-43.
4. Коротков В. А. Плазменная закалка слоя наплавки 30ХГСА //Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – № 5. – С. 19-21.

УДК 669.054.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ЧЕРТЕ НИЖНЕГО ТАГИЛА

Ю. Д. Исупов, voir.nt@rambler.ru

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил, Россия

Аннотация. Группой инженеров Нижнетагильского городского офиса ВОИР (Всероссийское общество изобретателей и рационализаторов) предпринята попытка оценить объемы и содержание ценных компонентов в техногенных 30-50-летних отвалах, расположенных в черте города.

Ключевые слова: техногенные отходы, отбор проб, перспектива использования сырья, рекультивация почвы.

Введение

Проблема переработки техногенных отвалов волнует мировое сообщество. Например, в Германии создан федеральный кадастр ресурсов, позволяющий получить информацию о расположении отвалов,

промышленных захоронений и других техногенных скоплений [1]. На северной окраине Нижнего Тагила на площади более 1 кв. км сформировались многолетние техногенные отходы слоем до 10 м, не подвергающиеся рекультивации. Источником их происхождения были отходы ТЭЦ, мартеновского и доменного производства 30-50-летней давности Новотагильского металлургического завода. Данные площади, находящиеся в черте города, не используются. Более того, наносят экологический вред окружающей среде в виде пыли, заражения стоков, грунтовых вод, образования расширяющейся пустоши. Исследование состава, глубины залегания и площади распространения техногенных отходов может стать предпосылкой их переработки и оздоровления местности.

Целью настоящей работы является определение содержания различных элементов в поверхностном слое нижнетагильских техногенных образований на глубине 2-4 м.

Методики и результаты

Пробы для поэлементного анализа отбирались с поверхности исследуемой площади, а также с помощью передвижной буровой установки с глубины 2 м и 4 м. Диаметр шнека 250 мм. Общее число проб 11 с площади 100х500 м, масса каждой от 1 до 1,5 кг. Затем их просушивали, усредняли механическим перемешиванием. Работу осуществили в 2016 г.

Пробы разделили на несколько частей, анализ которых проводили в Пермском государственном техническом университете (приборы S-3400N «Хитачи», «Брукер») и в Институте Физики УрО РАН (приборы «Spectrolame», «Optima 2100 DV», «SOLAAR M6»), г. Екатеринбург. Лабораторные плавки в печи конструкции Всероссийского института металлургической теплотехники (г. Екатеринбург) позволили получить из одинаковых навесок 245 г два металлических слитка: 6 г из проб с глубины 2 м и 103 г из проб с глубины 4 м.

В ходе исследований были выявлены следующие элементы, представляющие интерес для промышленного извлечения: Fe, Mn, Ti, V, редкоземельные элементы (табл. 1). В таблице не приведены значения содержания In, Ga, Tl, находящиеся в пределах от 2 до 17 г/т. Содержание Au, Pt, Ag ниже пределов чувствительности прибора.

Табл. 1. Содержание химических элементов в отвалах

Элемент	Содержание		Примеч.
	%	г/т	
Fe	13,64 (57,0)		Результаты из Перми
Mn	0,19 (1,45)		
Ti	0,23 (0,54)		
V	0,10 (0,54)		
Nd		32 (44)	Результаты из Екатеринбурга
La		41 (45)	
Y		17 (52)	
Zr		43 (350)	
Nb		20 (25)	
Без скобок – значения для глубины 2 м, в скобках – для глубины 4 м.			

Значения, приведенные в таблице, показывают, что содержание элементов увеличивается по мере удаления от поверхности и в некоторых случаях весьма значительно. Содержание железа – в 4 раза, марганца – в 7 раз, титана – в 2 раза, ванадия – в 5 раз. Редкоземельные элементы представлены содержанием около 20-40 г/т. Можно отметить, что содержание железа на глубине 4 м (57 %) близко содержанию его в металлургическом концентрате – 64 % [2], следовательно может представлять интерес для применения в металлургическом производстве. Содержание ванадия на той же глубине (0,54 %) соответствует его содержанию в руде Качканарского месторождения [3], и также, как и железо, может интересовать металлургов.

Выводы

Полученные результаты показывают, что содержание железа и ванадия в техногенных отходах Нижнего Тагила соизмеримы с их содержанием в металлургических продуктах и могут рассматриваться для промышленного применения в ходе рекультивации территории.

Литература

1. Металлическое сырье – в металлургических отвалах // Черные металлы. – 2016. – № 2. – С. 69-70.
2. Компания «EuroChem». – Режим доступа: <http://www.eurochemgroup.com/ru/product> (дата обращения: 24.01. 2019).
3. Качканарская группа железорудных месторождений // Википедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Качканарская_группа_железорудных_месторождений (дата обращения: 24.01.2019).

**Работа выполнена в рамках НИР*

УДК 658.588.8 + 621.785.5 + 621.791

«ОМОЛАЖИВАЮЩИЕ» РЕМОНТЫ КАК ВЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ

В. А. Коротков, д-р техн. наук, vk@udgz.ru

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил, Россия

Аннотация. Прогресс в методиках диагностики неисправностей оборудования позволяет выявлять узлы и детали, нуждающиеся в улучшении. Рассмотрены основные направления по совершенствованию ремонтов, позволяющие снизить частоту отказов отремонтированного оборудования.

Ключевые слова: ремонт, восстановление, упрочнение, механическое оборудование.

В горно-металлургической отрасли ремонтные расходы составляют значительную величину, поэтому их сокращение представляет актуальную задачу. Во время ремонтных остановок выполняется *ревизия* механизмов с определением недопустимых дефектов, после чего производится замена забракованных деталей. Частота ремонтов может определяться частотой отказов оборудования – *ремонт по отказу*. Но они занимают много времени, т. к. нет возможности к ним подготовиться. *Планово-предупредительные ремонты* (ППР) выполняются после определенной наработки, когда из опыта известно, что механизмы уже нуждаются в ремонте. Это сокращает время ремонтов, но допускает преждевременные ремонты, ибо износ не повторяется с большой точностью. С 90-х гг. наличие неисправностей определяют *вибродиагностикой* работающего оборудования,

что нашло отражение в названии ремонтов – *по фактическому состоянию* (РФС). Это исключает преждевременные ремонты. Если опустить совершенствование технологий сборки-разборки, чем занимаются постоянно, то для дальнейшего сокращения ремонтов оборудования остается увеличение его послеремонтной наработки. Это достигается мерами по замедлению образования трещин и износа. Такие ремонты получили название «омолаживающих». Работы здесь могут вестись по следующим направлениям:

- конструкционное снижение рабочих напряжений, особенно пиковых;
- оптимизация смазки;
- упрочнение рабочих поверхностей.

Конструкционное снижение рабочих напряжений

Изменение конструкции по уменьшению рабочих напряжений сопровождается падением производительности. Тем не менее, такой путь возможен, если годовая выработка оборудования, за счет сокращения ремонтных простоев, не уменьшится [1].

Другой путь заключается в уменьшении концентрации напряжений. Например, корпус 12-метрового штампа после непродолжительной эксплуатации разломился надвое. Его ремонтная сварка без «усиления» конструкции представлялась неперспективной. Но анализ напряженного состояния показал, что уровень напряжений по линии излома резко снижается в результате изменения всего лишь на 7 град. угла нижних ребер жесткости [2].

Оптимизация смазки

Смазка представляет собой прослойку, которая переводит внешнее трение (большое по величине) сопрягающихся поверхностей во внутреннее трение (небольшое по величине) смазочного материала. В 30-х гг. 20 в. стал известен эффект Ребиндера. Он показал, что трение способен снижать чрезвычайно тонкий (невидимый в оптический микроскоп) слой поверхностно-активных веществ (ПАВ). В связи с этим его можно назвать «невидимой смазкой». Для нанесения ПАВ на поверхность трения на Западе был разработан раствор, названный «Эпилам». В дальнейшем новые растворы ПАВ по аналогии продолжали именоваться «эпилами», присваивая каждому оригинальное название. В 60-х гг. в НИИЧаспроме был разработан эпилам ЭН-3 – раствор стеариновой кислоты в изооктане. Затем появились и непрерывно совершенствуются эпиламы на основе фторированного ПАВ [3]. Например, 0,05 % раствор перфторполиэфирной кислоты 6МКФ-180 в

Хладоне 113 (эпилам «Эфрен-2»). «Эпиламовая невидимая смазка» не отменяет применения обычной смазки, но повышает ее эффективность (снижая трение и износ) за счет исключения контакта трущихся поверхностей несмазанными участками и улучшения смазочных свойств поверхностного слоя основной смазки. Кроме того, во время перебоев в подаче основной смазки эпиламовая пленка долго предохраняет поверхности от «задигов». Эпиламирование предусматривает предварительное обезжиривание поверхности, смачивание ее эпиламом и сушку на воздухе, что вполне доступно к применению в ремонтах.

В 60-х гг. в СССР было зарегистрировано научное открытие № 41 – «эффект безызносности» [4]. Его суть в том, что из смазки, содержащей ионы или мелкодисперсные частицы вещества, на поверхностях трения осаждается тонкий (микронный) защитный слой, способный по мере изнашивания восстанавливаться. Таким образом, несмотря на трение и изнашивание, первичные поверхности деталей остаются без износа. Отсюда происхождение термина «эффект безызносности». Для его достижения в масла добавляют дисперсные порошки мягких (медь, серпентинит, фторопласт) и твердых (керамика, алмазы) материалов. Один из первых опытов применения смазки с добавкой порошка следующий. Износ направляющих станка затруднял нарезание резьбы на арматуре Ø68 мм: требовалось 3-5 проходов, при этом часто выходил из строя приводной двигатель из-за повышенной нагрузки. Добавка медно-свинцового порошка в СОЖ дала возможность нарезания резьбы за один проход; изношенные же направляющие были восстановлены до зеркального блеска [5]. Оптимизация выбора смазочных материалов может дополняться совершенствованием систем доставки их к узлам трения [6]. Такая работа без значительных капитальных вложений способна существенно продлить межремонтную наработку оборудования, о чем свидетельствуют интернет-сайты и объявления организаций, занимающихся продажей добавок к маслам и эпиламов.

Упрочнение рабочих поверхностей

Для всех сочетаний пар трения существует некоторый диапазон нагрузок и скоростей трения, в котором износ на несколько порядков ниже, чем вне этого диапазона [7]. Идет непрерывный поиск путей перемещения указанного диапазона в области более высоких значений давлений и скоростей. При этом важную роль играет упрочнение. В третьей четверти 20 в. нашли применение закалка ТВЧ, цементация, азотирование, наплавка,

напыление, что позволило существенно замедлить износ, и увеличить (до микронного уровня) точность подгонки деталей. Без упрочнения повышение точности не имеет смысла, ибо в этом случае дорогостоящие микронные сопряжения из-за быстрого износа превращаются в рядовые уже в начале эксплуатации. Благодаря микронной подгонке деталей, минимизированы зазоры, снижен шум, динамические нагрузки, вибрация; появилась возможность работы с минимальным изнашиванием на больших скоростях. В механизмах убрали регулировочные элементы, служащие для выборки зазоров при быстром изнашивании, что также положительно отразилось на надежности машин и оборудования. Машины нового поколения столь существенно увеличили наработку, что их называли «безремонтными».

Промышленный опыт показывает, что охват упрочнением функциональных поверхностей в горно-металлургической отрасли еще неоптимален, поэтому работы по упрочнению во время ремонтов вполне оправданы и способны приносить пользу. Остановимся на двух методах, которые имеют перспективы для применения именно при ремонтах, т. е. относятся к категории финишных, т. е. не требующих после их проведения завершающей механообработки. Это карбонитрация и ручная плазменная закалка установкой УДГЗ-200.

Карбонитрация

Карбонитрация – разработана в СССР в 70-х гг. и представляет собой насыщение поверхности азотом и углеродом в расплаве соли цианата калия. Свойства карбонитрированного слоя подобны свойствам слоя, полученного азотированием. На поверхности имеется тонкий слой (~5 мкм) твердого карбонитрида, под которым располагается насыщенный азотом слой (до 0,3 мм) с постепенно убывающей твердостью. Отличие в том, что азотированием упрочняются только легированные стали, а карбонитрация способна упрочнять обычные углеродистые стали. Карбонитрация не требует такой тщательной предварительной очистки, как азотирование, и выполняется гораздо быстрее (2 ч вместо 48 ч), чем азотирование. Детали машин могут изготавливаться по чертежным размерам и сразу после карбонитрации направляться в эксплуатацию. При этом снижается трудоемкость изготовления, приобретается износо- и коррозионная стойкость. Например, применение карбонитрации вместо закалки ТВЧ снизило расход ведущих валов-шестерней редуктора перемещения карьерного бурового станка СБШ-250 в 6 раз [8].

Плазменная закалка установкой УДГЗ-200

Закалка, как средство снижения износа, совершенствовалась путем применения высококонцентрированных источников поверхностного нагрева: газопламенного, в электролите, ТВЧ, лазерным лучом и др. Новый импульс закалка получила с разработкой в 2002 г. установки УДГЗ-200 (info@1m63.ru). К концу 2018 г. было произведено более 110 установок, которые поставлены на предприятия России, Украины, Казахстана, Азербайджана, Киргизии. В 2008 г. установка отмечена серебряной медалью на Женевском салоне изобретений и инноваций. Плазменная закалка не дает деформаций, благодаря чему закаленным деталям, во многих случаях, не требуется финишная шлифовка. Закалка происходит за счет отвода тепла в тело детали без подачи воды на место нагрева. Поэтому установка УДГЗ-200 применяется на ремонтных площадках по месту механообработки и эксплуатации деталей, а не только в термических цехах и на специализированных участках. Твердый (HRC45-65 – в зависимости от марки стали) слой закалки (0,5-1,5 мм) многократно увеличивает срок службы крановых рельс и колес, зубчатых и шлицевых соединений, канатных блоков, вырубных, формовочных, вытяжных штампов и других ответственных деталей [9]. С разработкой установки УДГЗ-200 закалка стала доступнее; ею закалывают то, что было невозможно ранее. При этом она может использоваться в составе автоматов или роботов.

Заключение

Современный электронный учет отказов, неисправностей и ремонтов облегчает выявление в оборудовании проблемных узлов, отказы которых определяют частоту ремонтов. Для замедления их выхода из строя и увеличения межремонтной наработки доступны к применению следующие средства: оптимизация конструкции для уменьшения рабочих напряжений; применение более эффективных смазочных средств; финишные методы упрочнения рабочих поверхностей (карбонитрация, ручная плазменная закалка и др.).

Литература

1. Орлов П. И. Основы конструирования : справ.-метод. пособие : в 2-х кн. – Кн. 1 / под ред. П. Н. Учаева. – М. : Машиностроение, 1988. – 560 с.
2. Гончаров К. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния штампа для формовки труб большого диаметра / К. А. Гончаров, Ю. Б. Чечулин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2011. – № 7. – С. 33-38.
3. Семенов А. П. О роли эпиламов в трибологии // Трение и износ. – 2010. – Т. 31, № 6. – С. 612-626.
4. Гаркунов Д. Н. Триботехника. – М. : Машиностроение, 1985. – 424 с.

5. Старосельский А. А. Долговечность трущихся деталей машин / А. А. Старосельский, Д. Н. Горбунов. – М. : Машиностроение, 1967. – 395 с.
6. Мироненков Е. И. Применение ЭГД-смазки в неконформных узлах трения металлургического оборудования / Е. И. Мироненков, А. М. Чумиков, Ю. В. Жиркин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2010. – № 4. – С. 19-23.
7. Костецкий Б. И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания // Трение и износ. – 1980. – № 4. – С. 622-637.
8. Коротков В. А. Техничко-экономическая эффективность карбонитрации // Вестник машиностроения. – 2017. – № 9. – С. 68-71.
9. Коротков В. А. Закалочная установка УДГЗ-200 для снижения себестоимости изготовления и увеличения долговечности деталей и штампов // Вестник современных технологий. – 2017. – № 4 (8). – С. 34-37.

УДК 620.19:658.562

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РЕНОВАЦИИ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ВАГОНОВ

В. А. Татаринцев, канд. техн. наук, v_a_t52@mail.ru

А. К. Толстошеев, канд. техн. наук, andrei742001@mail.ru

БГТУ, г. Брянск, Россия

***Аннотация.** Приведены результаты восстановления утраченных прочностных свойств литых деталей грузовых вагонов – элементов автосцепного устройства. Предложены технологии реновации для продления их жизненного цикла.*

***Ключевые слова:** деградация прочностных свойств, сопротивление разрушению, реновация, литые детали, заварка дефектов, термообработка.*

Безопасность работы элементов подвижного состава на всех этапах их жизненного цикла связана с достижением заданного уровня надежности изделий, который прогнозируется и обосновывается при их проектировании, закладывается при изготовлении и поддерживается в процессе эксплуатации за счет системы диагностики, технического обслуживания и ремонтов [1]. Жизненный цикл изделия состоит из следующих стадий: проектирование, подготовка производства, производство, эксплуатация и утилизация.

Целью исследования является применения реновационных технологий на различных стадиях жизненного цикла несущих литых деталей грузового

подвижного состава железных дорог – элементов автосцепного устройства грузовых вагонов.

В работе [2] рассмотрены комплексные проблемы качества и безопасности объектов железнодорожного транспорта, связанные с вопросами прочности, ресурса, надежности, живучести и хладостойкости. При этом отмечается, что на заданной стадии жизненного цикла железнодорожного объекта t риск i -го неблагоприятного события $R_i(t)$ должен быть меньше, чем приемлемый риск $[R_i(t)]$. Это касается в основном параметров вероятностей возникновения технологических дефектов, эксплуатационных повреждений, отказов, износа, разрушений, аварий и катастроф на всем наборе элементов подвижного состава и инфраструктуры железнодорожного транспорта.

На стадии *проектирования* широко применяют различные аналитические методы прогнозирования надежности. Они позволяют оценить влияние комплекса служебных свойств материала объекта, вероятности обнаружения в нём эксплуатационных повреждений, принятой системы технического обслуживания и ремонтов на показатели надежности.

В работе [3] предложен подход к оценке надежности с учетом диагностики эксплуатационных повреждений, а также системы технического обслуживания и ремонтов машины, что существенно влияет на характеристики надежности их элементов. Необходимость рассмотрения двух стадий развития разрушения (стадий зарождения и развития повреждений, приводящих к разрушению) связана с решением задач конструктивного и организационного обеспечения надежности: выбором материала, формы и размеров сечений, определением допускаемых величин и мест расположения технологических и эксплуатационных дефектов, назначением периодичности и объема диагностирования и ремонта. Изменение технического состояния объекта обусловлено процессами утраты (деградации) служебных свойств, протекающими в нем под влиянием совокупности эксплуатационных факторов, и представлено соответствующими стадиями процесса деградации технического состояния объекта.

Ремонтный цикл машины обычно задают в технической документации в виде детерминированной во времени последовательности плановых обслуживаний и ремонтов с указанием способов восстановления изделия после обнаружения в нем неисправностей или отказов. Там же оговариваются методы диагностики технического состояния для

обнаружения неисправностей и их частота в межремонтный период. Моделировали определительные испытания на надежность 79 грузовых вагонов с тяговыми хомутами автосцепки из стали 20Л и 66 грузовых вагонов с тяговыми хомутами из стали 20ГЛ по плану испытаний на надежность [NRT] (РД 50-690-89). По результатам моделирования рассчитывали показатели безотказности грузового вагона по отказам тягового хомута автосцепки – вероятность безотказной работы $P(t) = [1 - n(t)]/N$ и параметр потока отказов $\omega(t) = \Delta n/(N\Delta t)$, где $n(t)$, Δn – число отказов за время t и за интервал Δt , соответственно, N – количество объектов.

Из приведенных результатов расчета (рис. 1) видно, что примерно до 20 лет эксплуатации вероятность безотказной работы вагона при установке тяговых хомутов из стали 20ГЛ ниже, что связано с ее худшей сопротивляемостью развитию трещины. В последующие годы ситуация противоположно меняется в связи с появлением в эксплуатации существенно большего числа поврежденных хомутов из стали 20Л. Применение моделирования испытаний на надежность позволяет оценивать степень влияния различных факторов, включая реновацию объекта (заварку трещин, термообработку), систему технического диагностирования и ремонтов, на показатели надежности вновь проектируемых и уже эксплуатируемых технических объектов железнодорожного подвижного состава.

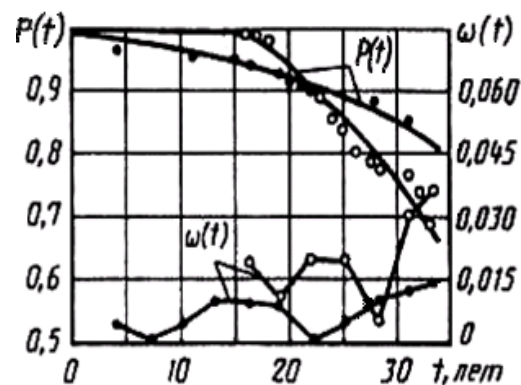


Рис. 1. Показатели безотказности грузового вагона по отказам тягового хомута автосцепки – вероятность безотказной работы $P(t)$ и параметр потока отказов $\omega(t)$ ● – сталь 20ГЛ, ○ – сталь 20Л

На стадии *изготовления*, а также при выполнении реновационных операций на вагоноремонтных предприятиях [4] в качестве основных параметров дефектов, по которым в технических требованиях регламентируется их исправление, приняты объем наплавляемого металла или отношение площади, подлежащей заварке, к площади поперечного сечения детали, а

также зона расположения исправляемого дефекта. В связи с этим целесообразно оценить влияние величины исправляемого дефекта на сопротивление циклическому разрушению литых деталей грузовых вагонов для оценки результата выполненной реновации и последующего его учета в расчетах на прочность и надежность.

Исследование сопротивления усталости отливок, с исправленными электросваркой дефектами, проводили на крупногабаритных образцах коробчатого сечения размерами 145×135 мм, толщиной 20-22 мм. Такой вид сечения является типичным для большинства ответственных зон литых деталей грузовых вагонов (автосцепки, боковой рамы, надрессорной балки), подверженных образованию технологических дефектов и эксплуатационных трещин. Образцы отбирали из двух плавок низколегированной стали 20ГФЛ с содержанием углерода и марганца близкими к верхнему допускаемому пределу. Этим обеспечивали заведомо неблагоприятную свариваемость металла. На образцах путем фрезерования канавок моделировали разделки литейных дефектов. Изменяя длину и ширину канавок при постоянной глубине, равной половине толщины стенки сечения (примерно 10 мм), были получены имитации разделок дефектов следующих объемов – 3 см³, 6 см³ и 12 см³. Усталостные испытания проводили на стенде ЦДМ-200пу при трехточечном поперечном изгибе образца на двух режимах нагружения – форсированном регулярном и для ускоренной оценки предела выносливости методом ступенчатого нагружения с возрастающей амплитудой (метод Локати по РД 50-686-89).

При обработке результатов испытаний исключали из рассмотрения образцы с литейными и сварочными дефектами в изломе. Результаты усталостных испытаний показали, что долговечность заваренных образцов не ниже, а иногда несколько выше бездефектных (табл. 1).

Для объяснения полученного результата было выполнено экспериментальное исследование изменения рабочих и остаточных сварочных напряжений в зоне расположения заваренной разделки дефекта методом канавки [5]. Установлено, что в этом сечении возникают остаточные растягивающие напряжения величиной 80-90 МПа. Эти напряжения уменьшаются по мере удаления от середины поперечного сечения и на расстоянии 25-35 мм от оси переходят в сжимающие остаточные напряжения, достигающие величины 50-70 МПа на расстоянии 10-15 мм от края. Образование сварочных остаточных сжимающих напряжений, противоположных по знаку рабочим растягивающим, приводит к

уменьшению суммарных напряжений в углах сечения и более благоприятному их распределению по ширине сечения. Это подтверждается еще и тем, что в образцах без дефектов зарождение трещины происходило, как правило, в углах опасного сечения, где действуют *большие* рабочие напряжения, а в заваренных – в околошовной зоне сварочного шва.

Табл. 1. Результаты усталостных испытаний бездефектных и заваренных образцов

Характеристика сопротивления усталости	Образцы без заварки	Заваренные образцы с объёмом наплавленного металла, V, см ³		
		3	6	12
Средняя долговечность до появления трещины, Nт·10-3, цикл.	288,0 1,0	366,6 1,27	324,7 1,13	284,0 0,99
Средняя долговечность до разрушения, Nр·10-3, цикл.	317,7 1,0	408,2 1,28	374,1 1,18	343,5 1,08
Живучесть, %	10,3	11,3	15,2	21,0
Средний предел выносливости σ_R , МПа	229	237	-	233

Примечание. Под чертой даны относительные величины.

По результатам усталостных испытаний образцов получена зависимость долговечности образца до появления трещины от величины объема заваренной разделки дефекта и занимаемой ею площади сечения (рис. 2). Видно, что увеличение объема завариваемой разделки дефекта приводит к снижению долговечности.

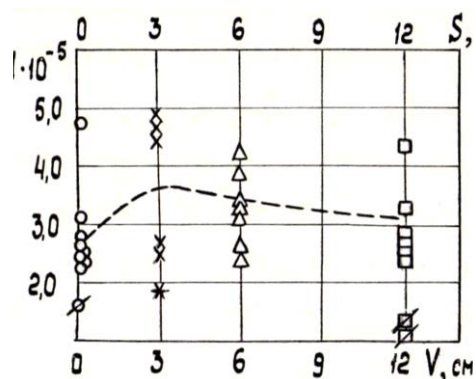


Рис. 2. Зависимость долговечности образцов от объема заваренного дефекта V и относительной площади сечения S, занятой дефектом

Долговечность не заваренных образцов в среднем находилась на уровне долговечности образцов с объемом заварки 12 см³, но ниже долговечности заваренных образцов объемом 3 см³ и 6 см³.

Приведенное сравнение показывает, что по долговечности до образования трещины и окончательного разрушения заваренные образцы имеют преимущество перед образцами в исходном состоянии. Это, по-видимому, связано с положительным перераспределением напряжений вследствие появления в напряженных зонах (краях сечения) сварочных сжимающих остаточных напряжений.

Качественная заварка разделанных технологических и эксплуатационных дефектов отливок коробчатого сечения с аналогичным законом изменения рабочих напряжений по ширине сечения не приводит к снижению их усталостной долговечности (рис. 2). Использование положительного эффекта от образования благоприятных остаточных сжимающих напряжений после заварки связано с выполнением следующих условий. Во-первых, место сварного шва должно быть в средней части коробчатого сечения и расположено достаточно близко к зоне, где требуется создать остаточные напряжения. Во-вторых, эпюры рабочих и остаточных напряжений должны быть неравномерными по ширине сечения и иметь разные знаки на краях сечения.

В работе [6] исследовали процесс утраты (деградации) прочностных свойств материала литого корпуса автосцепки в *эксплуатации*. Деграцию прочностных свойств наблюдали в автосцепках, проработавших в типичных условиях эксплуатации не менее 12 лет (продолжительность эксплуатации определялась по клейму даты изготовления). Для реновации утраченных прочностных свойств изучали влияние термической обработки на трещиностойкость корпусов автосцепок. Испытывали автосцепки после эксплуатации различной продолжительности, имеющие видимые трещины в переходной зоне от головы к хвостовику. Часть деталей, проработавших более 12 лет, подвергали нормализации. Испытания на разрыв проводили на специальном стенде, имеющем холодильную камеру. Автосцепки, охлажденные ниже второй критической температуры хрупкости, подвергали растяжению до разрушения. При этом записывали диаграммы «нагрузка – смещение» и фиксировали разрушающую силу, ее эксцентриситет и температуру. Диапазон температур соответствовал эксплуатационным значениям (до минус 50 °С). После разрыва уточняли размеры эксплуатационной трещины в изломе.

Анализ результатов исследования показал, что автосцепки, проработавшие менее 12 лет, разрушались при температуре от минус 50 до минус 40 °С по квазихрупкому механизму, а проработавшие больше этого срока разрушались при этих температурах хрупко. Причем разрушающая автосцепку сила в первом случае в 2-2,5 раза выше, чем во втором (при сравнимых величинах длин трещин). Автосцепки, подвергнутые нормализации после продолжительной эксплуатации (более 12 лет), разрушались квазихрупко, аналогично автосцепкам, в которых деграции прочностных свойств ещё не наблюдали (до 12 лет). Уровень разрушающих

нагрузок (2,0-2,6 МН) этих автосцепок также совпадает. Автосцепки, бывшие в эксплуатации более 12 лет, но не подвергнутые термической обработке, разрушались хрупко, величина их разрушающей силы составляла 0,9-1,4 МН при равных условиях испытаний.

Отбор деталей для реновации можно производить в два этапа [6]. Во-первых, по их наработке, начиная с 12 лет от даты изготовления. Во-вторых, по относительному увеличению на 8-10 % твердости в изучаемом нагруженном сечении по сравнению с ненагруженным. Определение твердости поверхностей на электронном переносном твердомере динамического действия ТЭМП-2 не превышало $\pm 5\%$ в рабочем диапазоне измерения 150-200 НВ и достигалось при программировании прибора на образцовых мерах твердости.

Для снятия эффекта деградации прочностных свойств и повышения их трещиностойкости рекомендуется применять нормализацию, которую можно осуществить в условиях вагоноремонтных заводов и депо. Для повышения сопротивления усталостному разрушению можно применять, например, способ термообработки [7] или термоулучшение корпуса автосцепки в соответствии с ГОСТ 22703-2012.

Таким образом, реновационные технологии, используемые в процессе изготовления и ремонта, являются тем инструментом, с помощью которого обеспечивается надежность реновируемых объектов, необходимое качество, требуемый ресурс и возможность вторичной (повторной) реновации объекта эксплуатации.

Литература

1. Усич П. А. Надежность рельсового нетягового подвижного состава / П. А. Усич, В. А. Карпычев, М. Н. Овечников. – М. : Маршрут, 2004. – 416 с.
2. Махутов Н. А. Разработка критериальной базы для оценки прочности, ресурса, живучести, хладостойкости и безопасности транспортных конструкций // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». – 2013. – № 3. – С. 20-31.
3. Татаринцев В. А. Прогнозирование прочностной надежности элементов подвижного состава с учетом их диагностики и ремонтного цикла // Транспорт: наука, техника, управление. – 2018. – № 9. – С. 35-40.
4. Бобров А. Л. Статистическая оценка неразрушающего контроля деталей автосцепного устройства на вагоноремонтных предприятиях / А. Л. Бобров, А. А. Данилина // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – № 6. – С. 57-61.
5. Малушин Н. Н. Совершенствование методики замера остаточных напряжений в наплавленных деталях методом канавки / Н. Н. Малушин, С. В. Богомолов, А. М. Росс // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 8. – С. 106.
6. Цветков И. С. Диагностика качества материала в эксплуатации для оценки времени начала реновации детали / И. С. Цветков, В. А. Татаринцев // Качество продукции:

контроль, управление, повышение, планирование : сб. науч. тр. 4-й Международной молодежной науч.-практич. конф. : в 3-х т. / отв. ред. Е. В. Павлов. – 2017. – С. 179-183.

7. Борц А. И. Способ термической обработки деталей. - Патент РФ 2415182 С1 ; 24.12.2009.

УДК 621.791

ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАВНОВЛЕНИЯ ЗАХВАТОВ «GLAMA»

А. В. Шерстобитов, 9826397820@mail.ru

ООО «Композит», г. Нижний Тагил, Россия

***Аннотация.** Дано описание технологии восстановления захватов ковочных манипуляторов. Проанализированы недостатки и преимущества.*

***Ключевые слова:** наплавка, восстановление, захваты, манипуляторы GLAMA, ковочные манипуляторы.*

Для нужд ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» работниками ООО «Композит» были выполнены работы по восстановлению захватов ковочных манипуляторов «GLAMA».

GLAMA Maschinenbau GmbH – производитель оборудования для тяжелой промышленности из Германии - выпускает различные типы манипуляторов. Они разделяются на: управляемые человеком и управляемые автоматикой (роботизированные). Бывают манипуляторы на колесном и на рельсовом ходу. Манипуляторы на рельсовом ходу имеют большую грузоподъемность и используются в комплексе с ковочным и прессовым оборудованием. Колесные манипуляторы осуществляют транспортировку заготовок из печи к прессам. Клещи бывают как поворотные (вращаются относительно оси), так и неповоротные.



Рис. 1. Манипулятор «Glama»

В работе на ВСМПО используются колесные манипуляторы с грузоподъемностью от 1 до 8 тонн. Температура перемещаемой заготовки около 1000 °С, что необходимо для увеличения пластичности титана при его деформировании в прессе.

Восстановлению подлежали захватные клещи от манипулятора модели «GLAMA GCM – 80/320», которая представляет собой колесный вариант с неповоротными клещами. Внешний вид механизма захватов в сборе представлен на рис. 2.

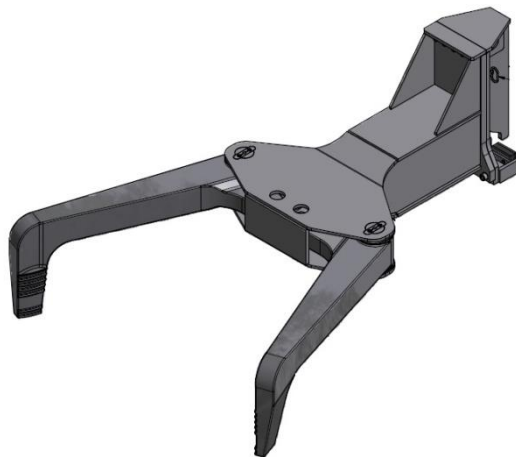


Рис. 2. Клещи в сборе



Рис. 3. Изношенный захват

Захваты изготовлены из материала GS-17 (CrMoV511), который по химическому составу близок к российским сталям 15X1M1Ф и 25X1M1Ф (табл. 1). Это стали жаропрочного класса, предназначенные для работы в условиях нагрева [1].

Табл. 1. Химический состав основного металла

Материал	Углерод (С%)	Марганец (Mn%)	Кремний (Si%)	Хром (Cr%)	Никель (Ni%)	Медь (Cu%)	Молибден (Mo%)	Ванадий (V%)
GS-17 CrMoV 5 11	0,15-0,2	0,5-0,9	≤ 0.6	1,20- 1,50	0,4	≤ 0,3	0,9-1,1	0,2-0,3
15X1M1 Ф	0,1-0,16	0,4-0,7	0,17-0,37	1,1-1,4	≤ 0,25	≤ 0,25	0,9-1,1	0,15-0,3
25X1M1 Ф	0,22- 0,29	0,4-0,7	0,17-0,37	1,5-1,8	≤ 0,3	≤ 0,2	0,6-0,8	0,15-0,3

При эксплуатации захваты изнашиваются в предельном случае на величину от 50 до 80 мм, что можно видеть на рис. 3. Наплавка слоя столь большой толщины сопряжена с риском образования трещин и его откалывания. Поэтому при назначении технологии использовали научно-производственный опыт из работы [2]. При восстановлении износа наплавкой целесообразно использовать возможность придания рабочему слою более высокой работоспособности [3]. Поэтому в данном случае была применена для наплавки высокохромистая (Cr – 16 %) сталь, отличающаяся повышенной стойкостью к образованию окалины при нагреве и изнашиванию трением [4].

Восстановление захватов производилось по технологии, разработанной в ООО «Композит». Операции располагались в следующем порядке:

1. Зачистка зоны восстановления угло-шлифовальной машинкой до металлического блеска.

2. Предварительный подогрев до 80-100 °С, во время перерывов захват укрывается в термополотно.

3. Наплавка в полуавтоматическом режиме изношенной части до плоскости проволокой Св-08Г2С в газовой смеси К12. Наплавка производится послойно. Каждый последующий слой выполняется перпендикулярно предыдущему.

4. Наплавка в полуавтоматическом режиме выступающей части захвата до восстановления геометрии участка проволокой Нп-26Х16ГСФ в газовой смеси К12 (рис. 4).

5. Наплавка поперечных валиков (рис. 5) в полуавтоматическом режиме проволокой Нп-26Х16ГСФ в газовой смеси К12 для улучшения захвата заготовок.

6. Отпуск детали в печи. Захваты разогреты в печи до 300 °С и выдержаны в течении 6 часов, далее остывание в печи до 100 °С.



Рис. 4. Восстановление износа 80 мм



Рис. 5. Поперечные валики для улучшения захвата

Опыт эксплуатации показал, что на отремонтированных захватах после работы в течение трех месяцев поперечные валики были изношены полностью. Ранее заказчик самостоятельно выполнял ремонт захватов, приваривая прутки диаметром 16 мм РДС, полный износ прутка происходил примерно за две недели. Таким образом, произведенный ремонт позволил увеличить межремонтный цикл в 6 раз.

Недостатком технологии можно назвать сложность выполнения ремонта и его длительность. Для приварки прутка достаточно было развести захваты в крайние положения и выполнить сварку, не требовалась длительная разборка и сборка механизма. Технологию восстановления захватов, примененную ООО «Композит», рационально использовать при износе всей рабочей зоны захвата.

Литература

1. Справочник сталей и сплавов / под общ. ред. А. С. Зубченко. – М. : Машиностроение, 2003. – 784 с.

2. Сварка в действующем производстве / В. А. Коротков, Э. Ж. Агафонов, И. Д. Михайлов [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2008. – № 12. – С. 2-7.
3. Коротков В. А. Проактивные ремонты в металлургической отрасли // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2014. – № 8. – С. 18-24.
4. Износостойкость, твердость и микроструктура наплавов с повышенным содержанием хрома / И. А. Растегаев, В. А. Коротков, М. А. Афанасьев [и др.] // Трение и износ. – 2018. – № 5. – С. 537-542.

УДК 621.791.92

СРАВНЕНИЕ СТОЙКОСТИ ПРОТИВ КАВИТАЦИИ И АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА НАПЛАВЛЕННЫХ СЛОЕВ ИЗ СТАЛЕЙ 06X19H9T И Fe-Cr-Ti-Al

Х. Л. Алван¹, lefta.hussam@gmail.comЮ. С. Коробов^{1,2}, д-р техн. наук, yukorobov@gmail.com¹УрФУ, г. Екатеринбург, Россия²ООО «Уральский институт сварки», г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Стойкость наплавленных слоев к кавитационной эрозии и абразивному износу была изучена для сталей 06X19H9T и Fe-Cr-Ti-Al (Урал AS-3 и ППМ-6). Процесс дуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом в инертном защитном газе (TIG) использовали для нанесения этих материалов на подложку из углеродистой стали. Ультразвуковой вибрационный метод был использован для испытания кавитационной эрозии, в то время как испытание на истирание резинового колеса было использовано для испытания на абразивный износ. Критерии потери массы и скорость износа каждого материала в зависимости от времени испытаний были получены и обсуждены. Испытания на кавитацию и абразивный износ показали аналогичные результаты в отношении ППМ-6, так что среди всех наплавленных материалов ППМ-6 был лучшим по сопротивлению кавитации и истиранию. 06X19H9T продемонстрировал более высокое сопротивление кавитации, чем Урал AS-3, в то время как в отношении абразивного испытания Урал AS-3 был несколько лучше, чем 06X19H9T.

Ключевые слова: абразивное изнашивание, износостойкость покрытий, порошковая проволока, сплошная проволока, кавитация, наплавка.

Введение

Компоненты оборудования и металлургическое оборудование подвержены поломкам из-за износа, возникающего во время работы. Повреждения, вызванные износом, влияют на поверхность деталей, поэтому следует производить ремонт изношенных поверхностей. Это приводит к увеличению стоимости оборудования. Поэтому необходимы разработки материалов и технологий для защиты поверхности деталей и повышения износостойкости [1]. В исследовании были рассмотрены абразивный износ и ультразвуковая вибрационная кавитация применительно к наплавленным слоям из сталей 06X19H9T и Fe-Cr-Ti-Al. Износ, вызванный кавитацией, является реальной проблемой, которая возникает в жизненно важных компонентах, таких как крыльчатки насосов, лопасти турбины, штока гидроцилиндров и гребные винты. Кавитационный износ влияет на производительность и срок службы этих компонентов [2]. Ремонт поврежденных компонентов с помощью наплавленных материалов сваркой

часто является целесообразным с экономической точки зрения. Абразивный износ также характерен для указанных выше деталей.

Материалы и методы исследования

Материалы. Две порошковые проволоки системы легирования Fe-Cr-Ti-Al (Урал AS-3 и ППМ-6) и сплошная проволока 06X19H9T диаметром 1,6 мм были наплавлены дуговой сваркой неплавящимся электродом в аргоне (TIG), ток 120 А, напряжение 12 В, на подложку из среднеуглеродистой стали. Химический состав сварочных проволок приведен в табл. 1. Толщина наплавленного слоя составляла 4^{-1} мм.

Табл. 1. Химический состав наплавленных материалов, мас. %

Материал	состав
06X19H9T	$\leq 0,08$ C; 18-20 Cr; 8-10 Ni; 0,4-1,0 Si; 1,0-2,0 Mn; $\leq 0,03$ P; $\leq 0,015$ S; ($5 \times C\%$) Ti, основа Fe
Урал AS-3	0,83 C; 25,0 Cr; 0,12 Ni; 0,5 Si; 0,4 Mn; 1,15 Al; 2,4 Ti, основа Fe
ППМ-6	0,6 C; 8,0 Cr; 1,5 Al; 1,0 Ti; основа Fe

Абразивное испытание. Эксперименты по испытанию на абразивный износ проводилась по методу Бринелля-Ховарта [3], установка представлена на рис. 1. Абразивные частицы пропускают из емкости по специальной трубке, в результате абразив поступает между образцом и вращающимся обрезиненным колесом, так что оно вращается в том же направлении, что и абразивный материал. В качестве абразивного материала применяли электрокорунд с размером частиц 125-180 мкм. На рычаг помещали определенную нагрузку, которая формирует сжимающую силу между обрезиненным диском и образцом. Размер образца для данного испытания составляет 70 x 18 x 8 мм. Общее время испытания на абразивный износ в этом исследовании составляло 10 минут, а измерения потери массы материала проводились каждую минуту с использованием аналитических демпферных весов АДВ-200 с погрешностью 1,0 мг. Параметры проводимых испытаний: нагрузка: 5 кг; скорость вращения диска: 75 об/мин; диаметр диска: 0,2 м; расход абразива: 110 г/мин; полное время испытания: 600 сек; плечо нагрузки: 0,3 м.



Рис. 1. Установка Бринелля-Ховарта для исследования износостойкости

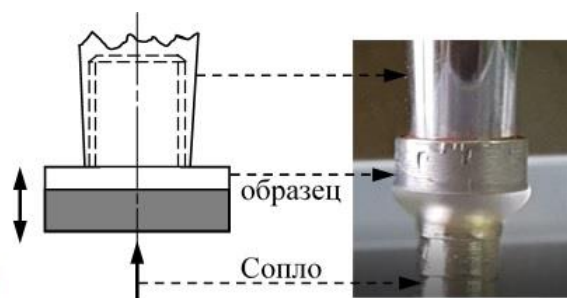


Рис. 2. Принцип работы установки по оценке кавитационной стойкости

Кавитационное испытание. Образцы для испытаний готовили в соответствии с требованиями стандарта ASTM G32-10. Условия испытаний кавитации, на разработанной авторами установке [3]: частота $20 \pm 0,1$ кГц, амплитуда 55 ± 3 мкм и мощность ультразвукового генератора 500 Вт. В качестве испытательного раствора использовалась вода, и было приложено определенное напряжение (12 В), чтобы ускорить кавитацию и дать комбинированный эффект. Описание принципа работы теста на кавитацию, принятого в этом исследовании, показано на рис. 2. Общее время воздействия теста на кавитацию составило 330 минут. Весы лабораторные равноплечие ВЛР-200 с погрешностью 0,5 мг использовали для оценки потери массы испытываемого образца.

Результаты исследования

Результаты абразивного износа. Потеря массы и скорость износа, как функция по времени испытания для наплавленных материалов и материала подложки, представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Разницу в потере массы между наплавленными материалами и подложкой можно легко сравнить. Существует небольшая разница в потере массы между Урал AS-3 и 06X19H9T, так что Урал AS-3 лучше, чем 06X19H9T, примерно на 10%. Лучшим материалом среди всех изученных материалов был ППМ-6. Он показал более высокую стойкость к абразивному износу, чем Урал AS-3 и 06X19H9T, примерно на 41 % и 56 % соответственно. Скорость абразивного износа, как функция времени испытаний для всех испытанных материалов, показана на рис. 4. Существует небольшая разница между Урал-АС-3 и 06X19H9T в начале испытаний, в то время как по сравнению с ППМ-6 можно увидеть отчетливую разницу. Максимальная скорость абразивного износа была зарегистрирована для материала подложки, которая составляла 90

мг/мин, в то время как минимальная скорость абразивного износа составляла 31 мг/мин для материала ППМ-6 как показано на рис. 5.

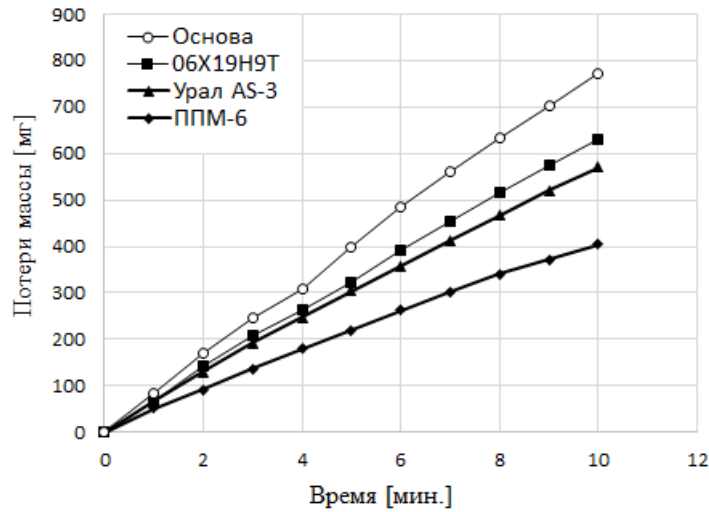


Рис. 3. Результаты испытаний абразивного износа материалов (потери массы)

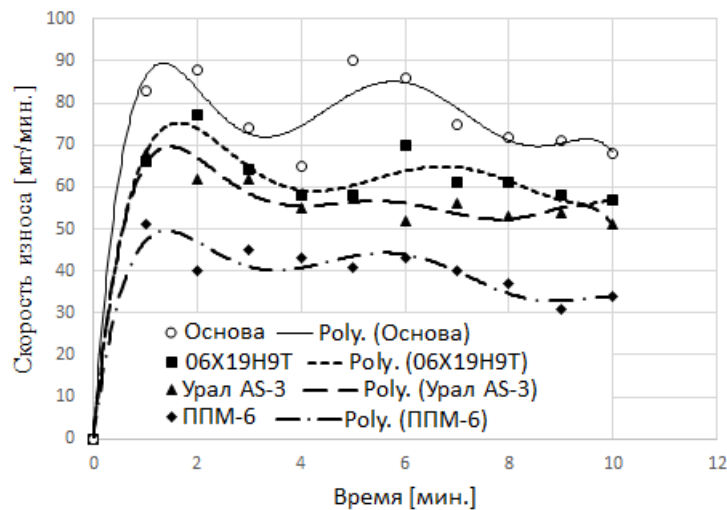


Рис. 4. Результаты испытаний на абразивную стойкость (скорость износа)

HV₁₀ измеряли для наплавленных материалов до и после абразивного испытания, как показано в табл. 3.

Табл. 3. HV₁₀ наплавленных материалов

Исследуемые материалы	HV ₁₀ перед испытанием	HV ₁₀ после испытания
06X19H9T	242 ± 12	331 ± 26
Урал AS-3	256 ± 2	244 ± 8
ППМ-6	685 ± 57	764 ± 5

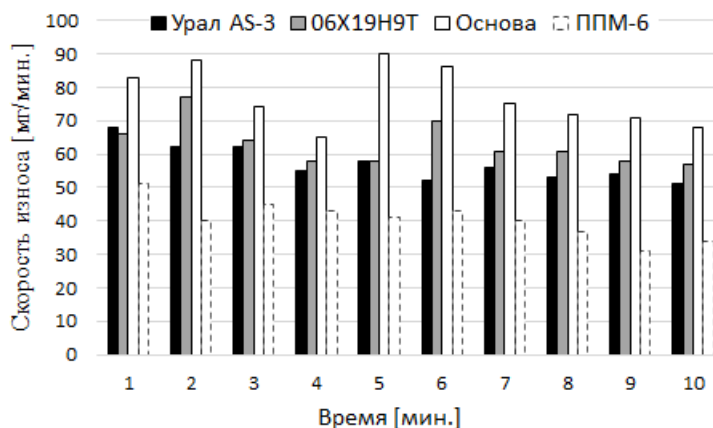


Рис. 5. Суммарный абразивный износ материалов (по потере массы)

Результаты кавитационных испытаний. Результаты кавитации показывают, что существует значительная разница в характеристиках каждого материала, но ППМ-6 и 06X19H9T демонстрируют почти одинаковое поведение, рис. 6.

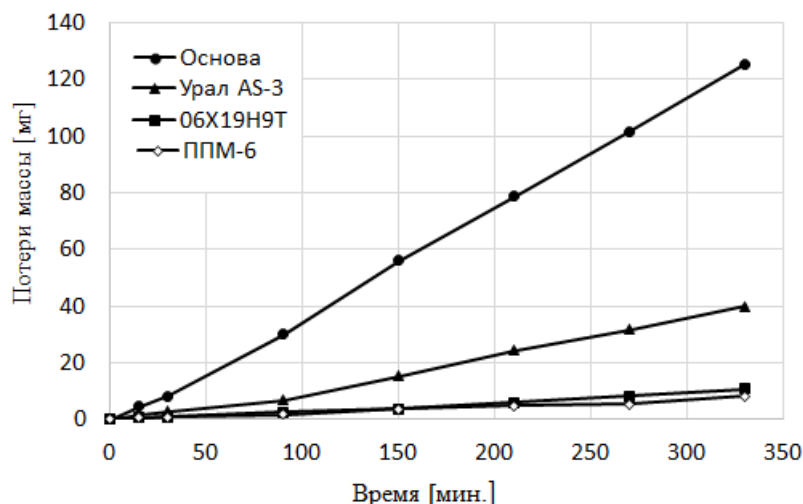


Рис. 6. Результаты испытаний на кавитационную стойкость

Выводы

- Все наплавочные материалы показали более высокую стойкость к абразивному износу и кавитации, чем материал подложки.
- Среди всех испытанных материалов ППМ-6 показал наилучшие результаты как для абразивного износа, так и для испытаний на кавитацию.
- 06X19H9T продемонстрировал лучшую стойкость к кавитации, чем у Урал AS-3. В отличие от этого Урал AS-3 показал несколько лучшую стойкость, чем 06X19H9T при абразивном износе.
- Для испытания на абразивный износ ППМ-6 был лучше, чем подложка, 06X19H9T и Урал AS-3 на 90 %, 56 % и 41 % соответственно. Для кавитации ППМ-6 был лучше, чем 06X19H9T,

на 30 %, в 5 раз лучше, чем Урал АС-3, и в 15 раз лучше, чем подложка.

Литература

1. Нефедьев С. П. Абразивная и ударно-абразивная износостойкость твердых наплавленных покрытий / С. П. Нефедьев, Р. Р. Дема, Д. А. Котенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 103-106.
2. Karimi A. Cavitation erosion of materials / A. Karimi, J. L. Martin // Int. Met. Rev. – 1986. – Vol. 31. – P. 1-26.
3. Сопротивление эрозионно-коррозионному кавитационному воздействию WC-CoCr- и WC-NiCr- покрытий, полученных методом HVAF / Ю. С. Коробов, Х. Л. Алван, Н. В. Лежнин [и др.] // СВАРКА И КОНТРОЛЬ : материалы международной научно-технической конференции, посвященной 130-летию изобретения Н. Г. Славяновым электродуговой сварки плавящимся электродом, Пермь, 18-21 сентября 2018 года. – Пермь, 2018. – С. 183-193.

УДК 621.7.09

ИССЛЕДОВАНИЕ АБРАЗИВНЫХ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. Г. Гирфанова, aliya_girfanova@list.ru

КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева, г. Казань, Россия

***Аннотация.** Аддитивные технологии в настоящее время вносят огромный вклад во многие сферы промышленности, делая процесс производства деталей и изделий сложной конфигурации более эргономичным. Они позволяют сократить затраты материала, время на производство и сборку, упростить конструкцию и снизить ее вес. Но и такие передовые технологии не лишены серьезных недостатков. Так, одной из проблем является высокая шероховатость получаемых заготовок вследствие прилипания несплавленных частиц на поверхности заготовки на границе детали с порошком. Представлен сравнительный анализ магнитно-абразивной обработки однослойных и двухслойных деталей, а также анализ ее влияния на механические свойства.*

***Ключевые слова:** аддитивные технологии, обработка поверхности, шероховатость.*

Шероховатость поверхности при послойном выращивание заготовки зависит от многих факторов: состав и размер порошка, мощность лазерного луча, скорость его прохода и другие режимные характеристики.

Шероховатость поверхности, а также «ступенчатость», которая является следствием послойного формирования заготовки, согласно заданными перед построением «сечениями», непосредственно влияет на функциональные свойства. Например, усталостные и фрикционные свойства, так как любые неровности на поверхности заготовки являются концентраторами напряжения [1, 2].

Необходимо учитывать, что значения шероховатости сильно варьируются в зависимости от того, какая из поверхностей заготовки рассматривается, что обусловлено анизотропией послойного выращивания [3, 4, 5]. На приведенных ниже фотографиях образца шероховатость боковых поверхностей – R_z 63 мкм, в то время как среднее значение на верхнем слое образца – R_z 160. Таким образом, наблюдается разница более чем в 2,5 раза.

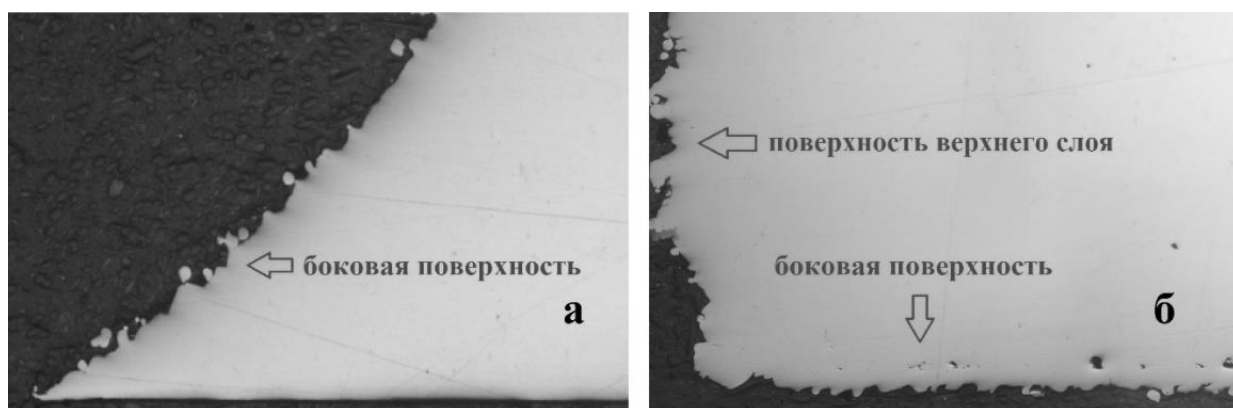


Рис. 1 Шероховатость поверхностей образца выращенного на 3D-принтере EOS 270 из мартенситной стали PH1 а, б [6]

Аддитивное производство наиболее актуально в авиа- и машиностроении. Привычная механическая обработка заготовок сложной формы с внутренними полостями не представляется возможной, требуется разработка и применение различных немеханизированных способов. Если для полимерных заготовок достаточно обработки в парах ацетона или обработки горячим воздухом, то для металлических изделий требуются более сложные подходы.

Абразивная обработка заключается во взаимодействии абразивной суспензии с внутренними поверхностями под действием давления или магнитных сил. Данный метод обработки имеет различные вариации в зависимости от сложности конфигурации заготовки, в частности, от того однослойная она или двухслойная.

Если деталь однослойная, то применяется суспензия содержащая в качестве абразивных частиц порошок карбида кремния (для алюминиевого

сплава $AlSi10Mg$ – 50 % от общей смеси зернистостью 20 и 80, добавленных в соотношении 1:1). Абразивная смесь перемещается под действием поочередного воздействия двух поршней и включает в себя до 390 циклов. В результате наблюдается снижение шероховатости с R_a 13-14 мкм до R_a 1,8 мкм [7].

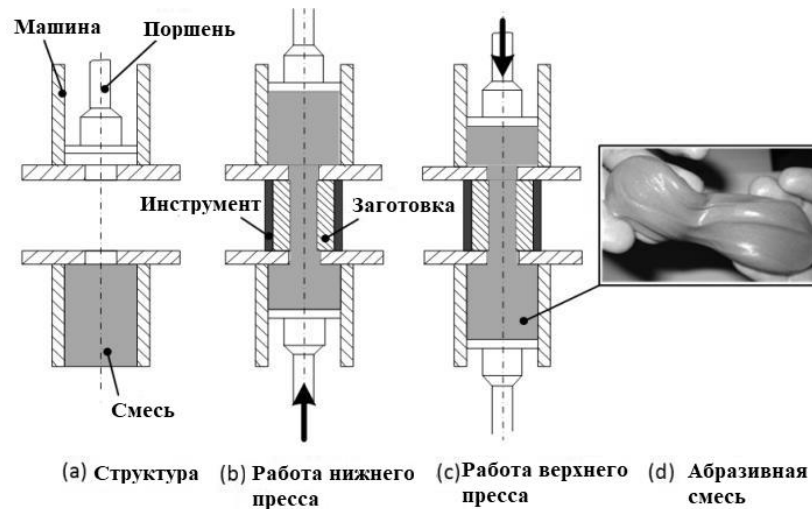


Рис. 2. Принцип абразивной обработки [7]

В случае обработки двухслойной детали для внутренних поверхностей в абразивную смесь помимо частиц порошка карбида кремния (с диаметром 40 мкм) добавляют порошок железа (диаметром 0,3 мм) в качестве магнитной составляющей с массовым отношением 9:1. Для создания магнитного поля использовали два магнита, расположенных снаружи заготовки, а также диаметрально намагниченный цилиндрический магнит, расположенный в центре заготовки вдоль осевого направления. Относительное движение создается вращением или линейным колебанием между заготовкой и магнитными абразивами смеси [8].

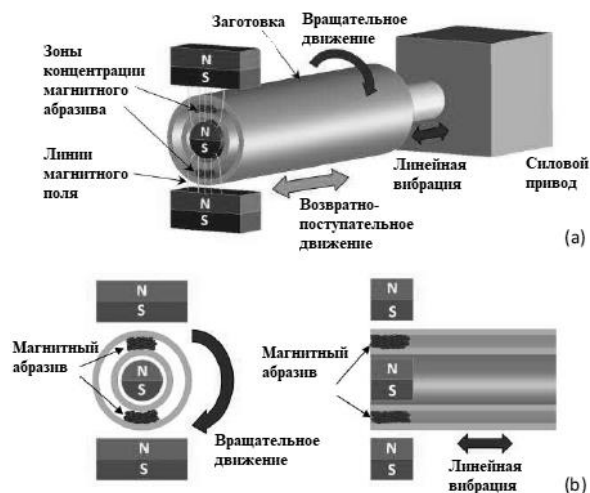


Рис. 3. Схема метода магнитной абразивной очистки двухслойной заготовки [8]

Шероховатости поверхности внутренней поверхности наружной трубы и наружная поверхность внутренней трубы были улучшены с 7 мкм R_a до примерно 0,5 мкм R_a , то есть более чем на 90 %.

В сравнение с другими ранее исследованными методами постобработки абразивная обработка имеет как ряд преимуществ, так и ряд недостатков. В сравнение с лазерной и импульсной электронно-лучевой видами обработки поверхности недостатком рассматриваемого метода являются большие временные затраты и более низкое качество шлифовки [9, 10]. Необходимо учитывать, что лазерная и импульсная электронно-лучевая обработки наилучшим образом подходят для обработки внешних поверхностей, в то время как абразивная обработка предназначена для внутренних поверхностей сложной конфигурации и, в частности, для обработки двухслойных заготовок.

Если же сравнивать абразивную обработку с технологией автоматического шлифования и полировки «DryLyte» компании «DLyte», то тут она проигрывает по большинству параметров. Это обосновывается тем, что «DryLyte» предполагает меньшие затраты по времени и не требует абразивной смеси, т. к. основана на протекании анодно-катодных реакций, при этом позволяет проводить обработку как внешних, так и любых внутренних поверхностей заготовки [11].

Таким образом, применение абразивной обработки может являться оптимальным видом постобработки в случае необходимости шлифовки только внутренних поверхностей сложной конфигурации, позволяя получить относительно низкое значение шероховатости. Необходимо заметить, что данный вид обработки способствует созданию поверхностных остаточных напряжений сжатия, которые повышают предел выносливости и долговечности детали, а также улучшают целостность поверхности детали.

Литература

1. Курынцев С. В. Аддитивные технологии – третья индустриальная революция / С. В. Курынцев, К. Ю. Нагулин, А. И. Горунов // Научные технологии в машиностроении : сб. статей. – Брянск, 2016. – № 7. – С. 39-44.
2. Зленко М. А. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015.
3. Курынцев С. В. Лазерная сварка заготовок, полученных аддитивными технологиями / С. В. Курынцев, А. Е. Морушкин, А. Х. Гильмутдинов // Аддитивные технологии: настоящее и будущее : материалы IV Международной конф. – М. : ФГУП «ВИАМ», 2018. – С. 62-71.

4. Лазерная сварка листовых элементов конструкций с деталями, полученными аддитивной технологией выращивания / С. В. Курынцев, А. Е. Морушкин, А. Х. Гильмутдинов [и др.] // Сварочное производство. – 2018. – № 1. – С. 10-13.
5. Kuryntsev S. V. The influence of pre-heat treatment on laser welding of t-joints of workpieces made of selective laser melting steel and cold rolled stainless steel / S. V. Kuryntsev // Optics & Laser Technology. – 2018. – Т. 107. – Р. 59-66.
6. Гирфанова А. Г. Постобработка поверхностей деталей, полученных аддитивными технологиями / А. Г. Гирфанова // Актуальные проблемы науки в студенческих исследованиях : сб. материалов VIII Всероссийской студенческой науч.-практич. конф., Альметьевск. – М. : Издательство «Перо», 2018 – С. 25-27.
7. A novel vibration-assisted magnetic abrasive polishing method for complex internal surface finishing / Jiang Guo, Ka Hing AU, Kui Lio, Seow Tong NG & Kah Chuan Sean SHAW // Euspen's 17th International Conference & Exhibition – Hannover, 2017.
8. Study on Improvement of Surface Roughness and Induced Residual Stress for Additively Manufactured Metal Parts by Abrasive Flow Machining / Can Peng, Youzhi Fu, Haibo Wei, Shicong Li, Xuanping Wang, Hang Gao // 4th CIRP Conference on Surface Integrity (CSI 2018) – 2018.
9. Combination of Laser Material Deposition and Laser Surface Processes for the Holistic Manufacture of Inconel 718 Components / J. I. Arrizubieta, M. Cortina J., E. Ruiz, A. Lamikiz / Materials (Basel) : электронный журнал. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1944/11/7/1247> (дата обращения: 25.12.2018).
10. Структура и свойства титанового сплава ВТ6, полученного методами аддитивного производства и подвергнутого импульсному электронно-пучковому воздействию / А. Д. Тересов, Н. Н. Коваль, Ю. Ф. Иванов [и др.] // Современные технологии и материалы новых поколений : сб. тр. Международной конф. с элементами научной школы для молодежи – Томск, 2017.
11. DryLyte® Technology. – Режим доступа: <http://www.ramal.cat/files/81/dlyte-chrome-cobalt-polishing-1> (дата обращения: 25.12.2018).

УДК 622.692.4

НОВЫЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ТЕЛ

А. К. Гумеров, канд. техн. наук

УГНТУ, г. Уфа, Россия

Аннотация. Приводится краткий обзор задач с сингулярными полями напряжений, начиная с простой трещины и до V-образных элементов из разнородных материалов. Получено решение общей задачи, из которого в частных случаях вытекают все известные решения. Показаны особенности оценки прочности и направления дальнейшего развития механики разрушения.

Ключевые слова: механика разрушения, трещина, непровар, сингулярность, напряжения, неоднородный элемент, концентрация напряжений.

Разрушение трубопроводов, как и всех других конструкций, происходит путем зарождения и развития трещин. Поэтому последнее столетие было отмечено бурным развитием механики разрушения, которая изучает особенности напряженного состояния вокруг трещин, предлагает критерии разрушения элементов конструкций с трещинами. Трещины отличаются от других (классических) дефектов тем, что при любой нагрузке в окрестности вершины трещины образуется сингулярное поле напряжений с особенностью вида $\sigma \rightarrow \infty$; чем ближе к вершине трещины, тем выше напряжения [1]. Если следовать классическим представлениям, любой конструктивный элемент с трещиной должен разрушиться при любой нагрузке, так как в вершине трещины напряжение превысит предел прочности для любого материала. В реальности картина иная: конструкции с трещинами работают, некоторые долго. Это говорит о том, что классическая теория прочности непригодна в случае трещин из-за наличия сингулярности вида $\sigma \rightarrow \infty$. Для таких случаев механика разрушения предлагает специальные критерии прочности: силовые (основанные на коэффициентах интенсивности напряжений – КИН), энергетические (на основе баланса энергий), деформационные (использующие раскрытие трещины) [2].

Существуют и другие дефекты, похожие по внешнему виду на трещины, например, непровары (дефекты сварки), расслоения металла (металлургические дефекты). Такие дефекты называют трещиноподобными (по форме) и к ним также применяют критерии, предложенные механикой разрушения [3].

С расширением круга конструкционных материалов, особенно с внедрением слоистых и композиционных материалов, выяснилось, что

трещины ведут себя по-разному в зависимости от того, где они находятся. Появились как предметы отдельного изучения «межфазные трещины», находящиеся на границе между двумя материалами (непровары, в соединениях разнородных материалов, расслоения в биметаллах и многослойных композиционных материалах) [3]. Особенности межфазных трещин и критерии разрушения для них и сегодня не до конца изучены.

Далее интерес сосредоточился на трещинах, пересекающих границу между двумя разными материалами (композиционные материалы, биметаллы). Обнаружилось, что трещины одну и ту же границу между разными материалами в одном направлении пересекают легко, в обратном направлении – значительно труднее. На этом свойстве, в частности, основана высокая прочность композиционных материалов. В них границы фаз блокируют развитие трещин. Особенности таких «пересекающих трещин» и критерии разрушения для них также не до конца изучены и требуют уточнений. Одна из проблем состоит в том, что размерности КИН в них не совпадают с размерностью вязкости разрушения K_{IC} для материалов.

Далее появились и другие сингулярности, особенно в связи с широким применением сварочных технологий. Это – элементы V-образной формы, присутствующие в сварных соединениях, в частности, переходы от углового шва к основному металлу [3]. С широким применением разнообразных ремонтных технологий проблема оценки влияния таких сингулярностей на прочность и остаточный ресурс актуализировалась. Циклические нагрузки и температуры способны ускорить зарождение и рост трещин, особенно это заметно в зонах сингулярности. Если в таких зонах изоляционное покрытие повреждено, и одновременно действует электрохимическая защита, то создаются все условия для протекания локальной стресс-коррозии.

С расширением номенклатуры материалов, особенно с применением композитов, появились сингулярные элементы внутри материалов. Некоторые особенности таких элементов исследованы [4], но до практической реализации результатов в нефтегазовой отрасли дело не дошло.

Как видим, круг разновидностей сингулярных элементов значительно расширился, и появилась потребность рассмотреть их с единой позиции, тем самым, во-первых, определить границы применимости подходов механики разрушения в теории прочности, во-вторых, определить общие закономерности и более эффективно решать практические задачи.

Анализ известных видов концентраторов напряжений показал, что сингулярность вида $\sigma \rightarrow \infty$ появляется в случаях, когда имеется

неоднородность по геометрическим и (или) механическим свойствам. На рис. 1 показан ряд элементов, создающих сингулярные поля напряжений вокруг особой точки O . Каждый предыдущий элемент в определенной мере является частным случаем последующего. Например, случай а) получается из случая б), если угол раскрытия устремить к нулю; случай г) переходит в а), если свойства материалов 1 и 2 принять одинаковыми; из случая л) можно перейти к случаю б), если материал 2 сделать пустым (модуль упругости E_2 устремить к нулю), а материалы 1 и 3 взять одинаковыми. Поэтому все случаи на рис. 1 можно рассматривать как частные случаи более сложного случая. Тогда простая трещина в однородном материале, которая является предметом изучения механики разрушения, будет являться всего лишь самым простым частным случаем более общей задачи о сингулярностях.

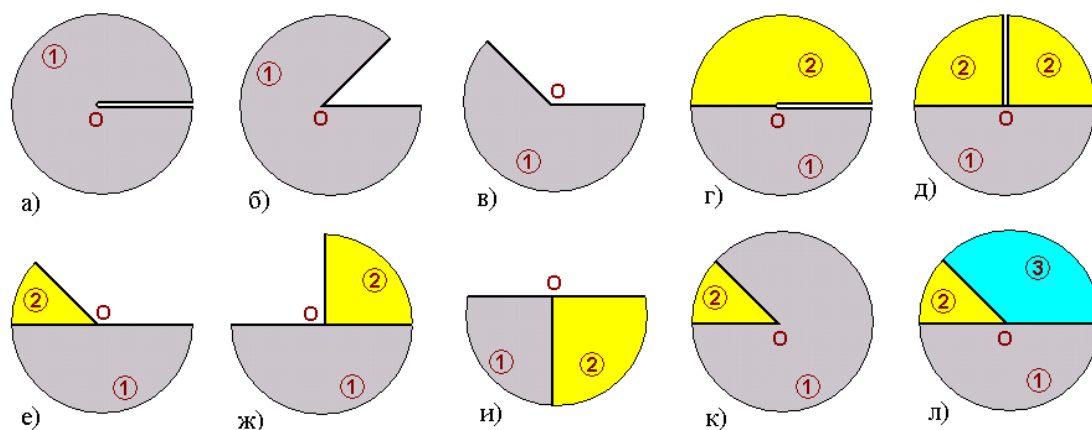


Рис. 1. Схемы элементов, создающих сингулярное поле напряжений вокруг точки O ; 1, 2, 3 – материалы, отличающиеся механическими свойствами; трещина в однородном материале (а); двугранный угол в однородном материале (б, в); межфазная трещина (г); пересекающаяся трещина (д); составной двугранный угол (е, ж); краевая точка стыка (и); внутренние V-образные элементы в гетерогенных материалах (к, л).

В качестве примера остановим внимание на случае к), который удобен в методическом плане и имеет самостоятельное практическое значение. Итак, выберем расчетную схему, показанную на рис. 2, и поставим задачу изучить особенности напряженного состояния в окрестности особой точки O – вершины составного двугранного угла.

Используем метод комплексных потенциалов. При этом допустим, что поле упругих смещений и деформаций не зависит от одной из декартовых координат, например, от z . Так переходим к плоской задаче [1]. В этом частном, но важном случае все смещения и напряжения можно представить через аналитические функции $\Phi(z)$ и $\Psi(z)$ комплексной переменной $z = x + iy$ (одинаковое обозначение z для декартовой координаты и

комплексной переменной не должно приводить к путанице). Эти функции называются комплексными потенциалами. Уравнения, которым должны удовлетворить комплексные потенциалы, имеют вид:

$$\sigma_t + \sigma_n = 2[\Phi(z) + \overline{\Phi(z)}]; \quad \sigma_n - \sigma_t + 2i\tau_{tn} = 2\lambda^{2i\alpha} [\bar{z}\Phi'(z) + \Psi(z)]; \quad (1)$$

$$2\mu(u + iv) = \chi\varphi(z) - z\overline{\varphi'(z)} - \overline{\psi(z)}. \quad (2)$$

Здесь u, v – смещения точек вдоль осей x, y соответственно; μ, ν – модуль сдвига и коэффициент Пуассона материала; $\chi = 3 - 4\nu$ (при $\varepsilon_z = 0$); $\varphi'(z) = \Phi(z)$; $\psi'(z) = \Psi(z)$; $\sigma_t, \sigma_n, \tau_{tn}$ – компоненты тензора напряжений в системе координат $(t-n)$; α – угол между осями x и t (направление отсчёта от x к t). Если принять $\alpha = \theta$, то напряжения $\sigma_t, \sigma_n, \tau_{tn}$ переходят в $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$.

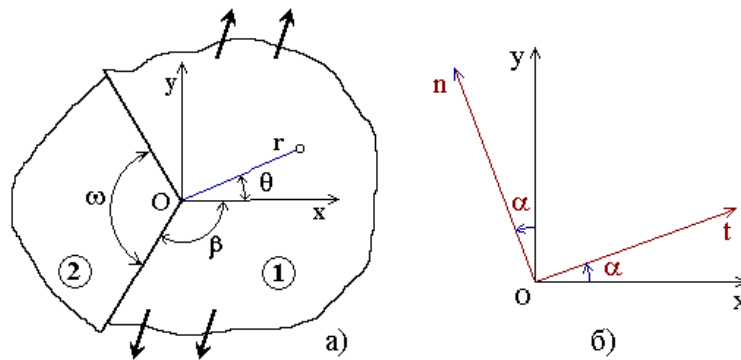


Рис. 2. Расчетная схема элемента с V-образной границей раздела между материалами (а) и принятая система координат (б)

Из схемы задачи следует, что множество искомым решений допускает группу подобия: функции $\Phi(z)$ и $\Psi(z)$ должны удовлетворять уравнению $C_2 f(C_1 z) = f(z)$, где C_1 и C_2 – некоторые постоянные. Физический смысл этого условия состоит в том, что общий вид поля напряжений качественно сохраняется, если изменим (уменьшим или увеличим) масштаб области в окрестности сингулярной точки. Например, если изменить масштаб в C_1 раз (рассмотреть картину в микроскоп с увеличением C_1), то «увидим», что напряжения во всех точках увеличились ровно в C_2 раз. При этом качественная картина не изменяется. Условно такое свойство называют принципом микроскопа. Из данного свойства вытекает, что комплексные потенциалы должны иметь степенной вид:

$$\Phi(z) = A \cdot z^{-\lambda}; \quad \Psi(z) = B \cdot z^{-\lambda}, \quad (3)$$

где A, B, λ – некоторые постоянные, которые могут быть действительными или комплексными. В справедливости такого утверждения можно убедиться прямым методом, подставляя выражения (4) в уравнения

(1). Используя функции (3) и исходные формулы (1, 2), получаем выражения для напряжений:

$$\sigma_{\theta} = K r^{-\lambda} \cdot f_{\theta}(\theta); \quad \sigma_r = K r^{-\lambda} \cdot f_r(\theta); \quad \tau_{r\theta} = K r^{-\lambda} \cdot f_{r\theta}(\theta). \quad (4)$$

В выражениях (4) введен коэффициент K , который по аналогии с трещиной следует назвать коэффициентом интенсивности напряжений – КИН. Этот коэффициент пропорционален нагрузке. Функции $f_{\theta}(\theta)$, $f_r(\theta)$, $f_{r\theta}(\theta)$ описывают распределение напряжений $\sigma_{\theta}(\theta)$, $\sigma_r(\theta)$, $\tau_{r\theta}(\theta)$ по кругу $r=1$ при нагрузке, соответствующей значению $K=1$. Кроме полярного угла θ эти функции содержат параметр λ .

Так, решение разделилось на три множителя, зависящие только от нагрузки (K), расстояния от особой точки ($r^{-\lambda}$), угловой координаты $f(\theta)$.

Одним из важных параметров в решении является λ , который в данной задаче может принимать три значения; обозначим их λ_1 , λ_2 , λ_3 . Соответственно, подставляя эти значения в выражения (4), получаем несколько частных решений. Тогда общее решение получится суммированием частных решений (из свойства линейности задачи и принципа суперпозиции):

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= K_1 r^{-\lambda_1} \cdot f_{\theta 1}(\theta) + K_2 r^{-\lambda_2} \cdot f_{\theta 2}(\theta) + K_3 r^{-\lambda_3} \cdot f_{\theta 3}(\theta); \\ \sigma_r &= K_1 r^{-\lambda_1} \cdot f_{r 1}(\theta) + K_2 r^{-\lambda_2} \cdot f_{r 2}(\theta) + K_3 r^{-\lambda_3} \cdot f_{r 3}(\theta); \\ \tau_{r\theta} &= K_1 r^{-\lambda_1} \cdot f_{r\theta 1}(\theta) + K_2 r^{-\lambda_2} \cdot f_{r\theta 2}(\theta) + K_3 r^{-\lambda_3} \cdot f_{r\theta 3}(\theta). \end{aligned} \quad (5)$$

Значения параметра λ зависят от упругих свойств материалов 1 и 2, образующих V-образный элемент, а также от угла ω , образованного этим элементом. В качестве примера на рис. 3 показаны графики зависимости $\lambda(\omega)$ для пары материалов, отличающихся по модулю упругости в 5 раз.

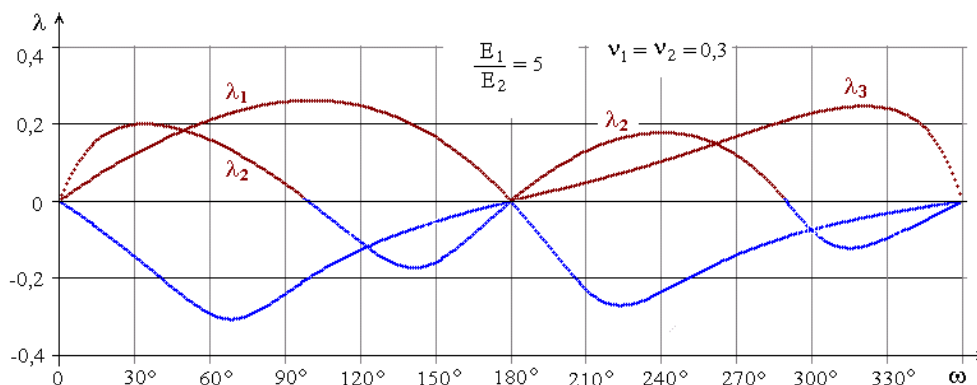


Рис. 3. Значения параметра λ в зависимости от угла ω при заданном соотношении упругих свойств материалов, образующих V-образный элемент по схеме рис. 2

Исследования позволили обнаружить ряд важных закономерностей. Из всего набора решений только два значения параметра λ являются положительными и, следовательно, приводят к сингулярности вида $\sigma \rightarrow \infty$ при $r \rightarrow 0$. Остальные значения параметра λ либо отрицательные, либо нули, поэтому в окрестности сингулярной точки O их роль незначительна.

Полученное решение при соответствующих условиях ($E_2 \rightarrow 0$; $\omega \rightarrow 0$) переходит в известное решение для трещины в однородном материале. В случае трещины размерность всех коэффициентов интенсивности напряжений одинаковая и постоянная, определяется соотношением

$$\sigma \sim K_I / \sqrt{r} \quad \text{или} \quad [K_I] = \text{Па} \cdot \text{м}^{0,5} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^{1,5}} = \text{Н} \cdot \text{м}^{-1,5}. \quad (6)$$

В общем случае, показанном на рис. 2, размерности КИН определяются значениями параметра λ и имеют вид

$$\sigma \sim K r^{-\lambda} \quad \text{или} \quad [K] = \text{Па} \cdot \text{м}^\lambda = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^\lambda = \text{Н} \cdot \text{м}^{(\lambda-2)}. \quad (7)$$

Поскольку параметр λ в данной задаче зависит от упругих свойств материалов E_1 и E_2 , а также от угла ω , то получается, что КИН в данном случае не имеет постоянной размерности. Более того, КИН в отдельных слагаемых (частных решениях) решения (5) отличаются друг от друга.

Данное свойство КИН создает значительные трудности при расчетах прочности. Обычно в расчетах используют такое понятие, как вязкость разрушения K_{IC} , физический смысл которой состоит в том, что считается, что разрушение наступает в тот момент, когда коэффициент интенсивности напряжений K_I достигает своего предельного значения, равного значению K_{IC} . В задачах с V-образным элементом (рис. 2) невозможно так просто выразить условие разрушения, так как величины K_1 , K_2 , K_{IC} несопоставимы, имеют разные размерности. Поэтому возникает проблема – как определить условия прочности элементов конструкций с такими сингулярными точками. Эта проблема требует энергетического подхода.

Полученные решения имеют вполне реальные физические воплощения; сингулярные поля напряжений можно наблюдать на фотоупругих моделях и сопоставить с полученными решениями.

Литература

1. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. – М. : Наука, 1974. – 640 с.
2. Партон В. З. Механика упругопластического разрушения / В. З. Партон, Е. М. Морозов. – М. : Наука, 1985. – 502 с.
3. Сунагатов М. Ф. Развитие методов механики разрушения в нефтегазовом комплексе / М. Ф. Сунагатов, А. К. Гумеров, Д. Л. Хакимов – СПб. : Недра, 2010. – 280 с.

4. Гумеров К. М. Теоретический анализ особенностей напряженного состояния в композиционном материале с V-образной границей раздела между компонентами с разными модулями упругости / К. М. Гумеров, А. А. Распопов, Л. В. Виноградов // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т.16, № 2. – С. 130-138.

УДК 622.692.4

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. К. Гумеров¹, канд. техн. наук

Л. Б. Шрон², канд. техн. наук

¹УГНТУ, г. Уфа, Россия

²СевГУ, г. Севастополь, Россия

***Аннотация.** Показано, что в краевых зонах стыка соединений разнородных материалов может возникать сингулярное поле напряжений, аналогичное трещине. Это требует применения подходов механики разрушения при оценке прочности. Путем подбора конфигурации стыка можно избежать появления сингулярности и добиться более высокой прочности. Рассмотрены также особенности межфазной и поперечной трещины на границе раздела фаз в механически разнородных элементах.*

***Ключевые слова:** механическая неоднородность, концентрация напряжений, сингулярность, трещина, механика разрушения, прочность.*

Разнообразие используемых в промышленности конструкционных материалов привело к появлению деталей и соединений из разнородных металлов (биметаллы, плакированные листы, композиционные материалы, соединения из разных марок сталей и сплавов и др.), иногда с контрастными механическими характеристиками (упругими свойствами, коэффициентом теплового расширения, пределами прочности и текучести). В свою очередь, механическая разнородность в некоторых случаях становится причиной возникновения концентрации напряжений. Представлены некоторые результаты исследования особенностей напряженного состояния и склонности к хрупким разрушениям соединений разнородных материалов и биметаллов.

Установлено [1], что в соединениях разнородных материалов в краевых зонах стыка (рис. 1а) при определённых конфигурациях возникает

сингулярное поле напряжений вида $\sigma \rightarrow \infty$. Характер сингулярности аналогичен случаю обычной трещины и описывается формулой вида

$$\sigma_{ij} = K r^\lambda f_{ij}(\varphi), \quad (1)$$

где r, φ – полярные координаты относительно рассматриваемой краевой точки стыка (рис. 1б); K – коэффициент интенсивности напряжений (КИН), линейно зависящий от нагрузки; λ – параметр особенности, который зависит от соотношения упругих свойств материалов и угла между поверхностью детали и плоскостью стыка; $f_{ij}(\varphi)$ – функции, определяющие распределение компонент напряжений вокруг краевой точки.

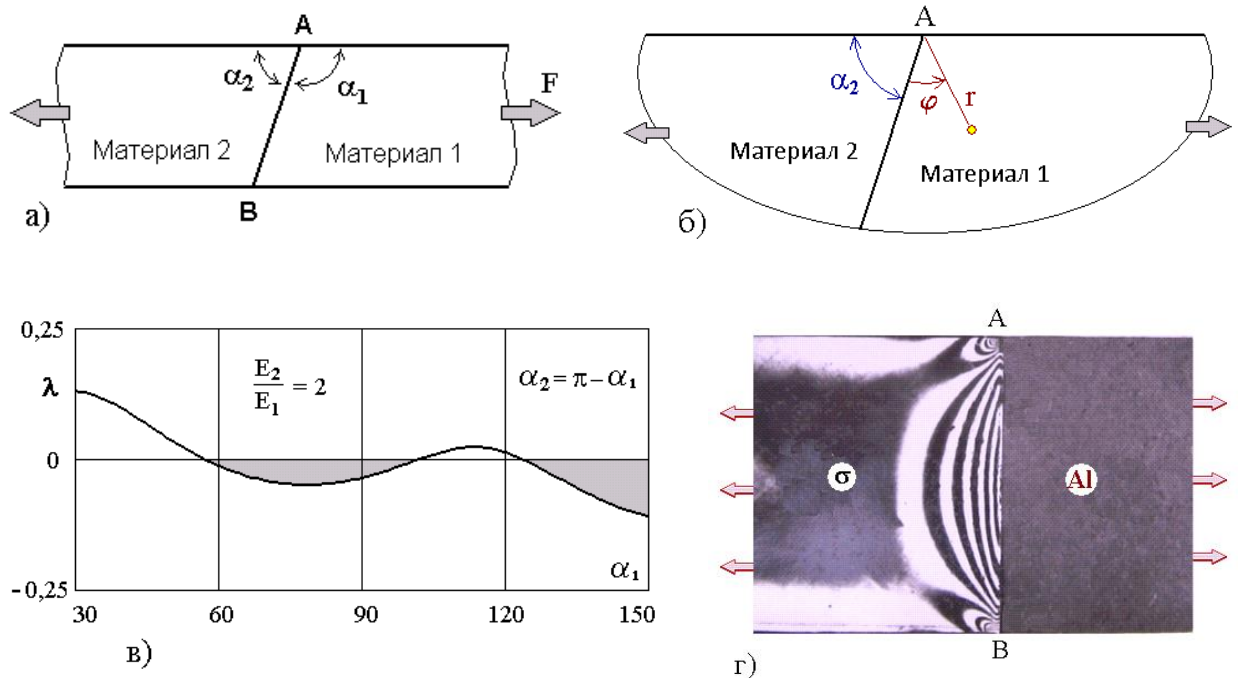


Рис. 1. Модель соединения разнородных материалов (а), выбор системы координат (б); зависимость параметра λ от угла наклона стыка (в); фотоупругая картина изохром в соединении полиуретана с алюминием (г)

На рис. 1в показана характерная зависимость параметра λ от угла наклона стыка α_1 при соотношении модулей упругости материалов $E_2/E_1 = 2$. Видно, что в зависимости от значения α_1 параметр λ может быть как положительным, так и отрицательным. Как следует из выражения (1), при отрицательных значениях параметра λ в краевой зоне стыка возникает концентрация напряжений с сингулярностью типа $\sigma \rightarrow \infty$ (рис. 1г). Соответственно, при положительных значениях λ будет наблюдаться обратная картина: $\sigma \rightarrow 0$ (эффект малонапряженности).

С точки зрения прочности концентратор типа $\sigma \rightarrow \infty$ эквивалентен трещине, казалось бы, можно использовать те же методы, которые применяются в задачах с трещиной. Как известно, в механике разрушения прочность детали с трещиной определяют, используя один из следующих критериев прочности:

1). Силовой критерий (K -подход), который выражается условием $K_I \leq K_{IC}$, где K_I – коэффициент интенсивности напряжений в окрестности трещины; K_{IC} – вязкость разрушения материала – одна из прочностных характеристик материала наряду с пределами упругости, пластичности, усталости и т. д.

2). Энергетический критерий (G -подход), который выражается условием $G \leq G_C$, где G – интенсивность высвобождения энергии деформаций при продвижении (росте) трещины; G_C – энергия, необходимая на разрыв материала и образование новой поверхности. Нередко характеристику G_C называют также вязкостью разрушения, так как между ними существует однозначная связь [2]

$$G_C = K_{IC}^2(1 - \mu^2)/E, \quad (2)$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

3). Деформационный критерий (δ -подход), выражается в виде $\delta \leq \delta_C$, где δ – раскрытие трещины; δ_C – критическое раскрытие трещины – характеристика материала.

В задаче, схематически изображенной на рис. 1а, напрямую ни один из этих критериев невозможно использовать.

Использованию K -подхода в данной задаче препятствует то, что коэффициент интенсивности напряжений K в формуле (1) имеет плавающую размерность в зависимости от значения параметра λ , который в свою очередь, зависит от соотношения модулей упругости материалов 1 и 2, а также от углов α_1 и α_2 . Поэтому коэффициент K в данной задаче невозможно сравнить с вязкостью разрушения K_{IC} , размерность которой фиксирована $[K_{IC}] = \text{Нм}^{-1,5} = \text{Па м}^{0,5}$.

Для использования G -подхода требуется предварительно определить взаимосвязь параметров G и G_C с напряженным состоянием, которое выражается формулой (1). Это требует высокоточных численных расчетов.

δ -подход в данной задаче вообще не имеет смысла, так как в исходном состоянии трещины нет, соответственно, нет и раскрытия трещины.

Таким образом, реальную перспективу имеет только G -подход. Для этого предлагается найти такую эквивалентную трещину, которая по энергетическому состоянию представляла бы такую же опасность для детали, как и краевая зона стыка со своей концентрацией напряжений (1). Размер (глубину) эквивалентной трещины можно оценить энергетическим методом, продвигая трещину по стыку, начиная с краевой точки, и определяя при этом интенсивность высвобождаемой энергии деформаций. Такая работа нами проделана и для некоторых случаев получены необходимые аппроксимирующие формулы. Это позволило применить методы механики разрушения к бездефектным соединениям разнородных материалов.

Вид графика зависимости параметра λ от угла α_l подсказывает, что путем подбора конфигурации стыка можно избежать появления концентрации напряжений с сингулярностью вида $\sigma \rightarrow \infty$. Для этого надо вывести стык под таким углом α_l , при котором параметр λ имеет нулевое либо положительное значение. Такие исследования нами выполнены, методом конечных элементов рассмотрены соединения с разными формами стыка (рис. 2).

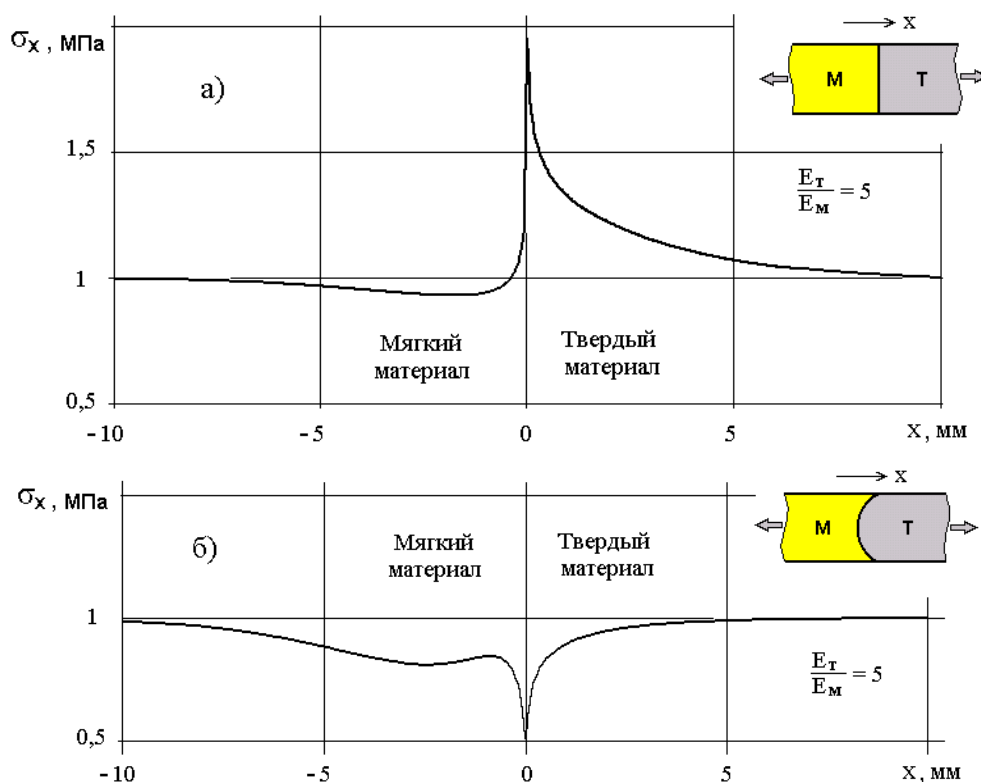


Рис. 2. Распределение напряжений на боковой поверхности соединения; соотношение модулей упругости материалов $E_T/E_M = 5$; номинальное напряжение $\sigma_{\text{ном}} = 1$ МПа

Решения показали, что если стык плоский (прямой или наклонный), то в одной или двух краевых зонах образуется концентрация напряжений. Поэтому более удачная форма стыка круглая, когда мягкий материал (M) занимает острый угол по краям. При этом все краевые зоны стыка становятся зонами малой напряженности. Некоторое повышение напряжений будет наблюдаться во внутренних зонах соединения, но за счет большой площади перегрузка будет незначительная (не более 5 %). За счет такого специфического распределения напряжений соединения с круглой формой стыка будут лучше работать и при изгибающих моментах.

Анализ зависимости $\lambda(\alpha)$ показал, что в соединениях с кривым стыком угол α должен находиться в диапазоне $(0; 50^\circ)$.

Исследования также показали, что концентрации напряжений можно избежать и при плоском косом стыке, когда угол α задан строго определенным. Этот угол сложным образом зависит от соотношения модулей упругости и коэффициентов Пуассона материалов. Например, для материалов с одинаковыми коэффициентами Пуассона $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$ этот угол равен 57° .

Также исследовано поведение трещин, продвигающихся вдоль границы раздела материалов (рис. 3а), и пересекающих эти границы (рис. 3б). Установлено, что в биметаллах сингулярность поля напряжений типа $\sigma \rightarrow \infty$ сохраняется, но порядок особенности λ и коэффициент интенсивности напряжений (КИН) сильно зависят от соотношения упругих свойств сопрягаемых материалов. При этом оценка трещиностойкости по силовому критерию затруднена из-за несоразмерности КИН для трещины вблизи границы раздела материалов и стандартной характеристики разрушения – K_{IC} для каждого из материалов в отдельности. Оценки, выполненные с применением энергетического критерия прочности, показали, что при равных других условиях проникновение трещины из мягкого материала в твердый (с большим модулем упругости) затруднено, а из твердого материала в мягкий происходит при меньших усилиях. Это явление коррелирует со значениями параметров λ , описывающих сингулярность типа $\sigma \rightarrow \infty$ в соответствии с выражением (1).

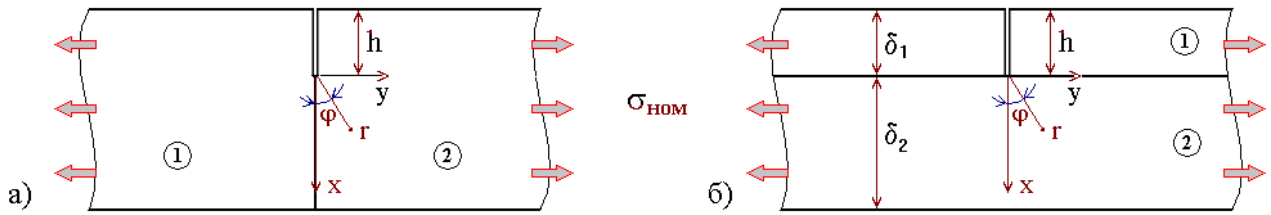


Рис. 3. Модели трещин в механически неоднородных элементах; межфазная (а) и поперечная (б)

Таким образом, изучен ряд закономерностей влияния упругой неоднородности материалов на напряженное состояние и склонность к разрушению. Также определены направления практического применения полученных результатов для оценки и повышения прочности упруго-неоднородных элементов.

Литература

1. Гумеров К. М. Разработка методик расчетной оценки напряженно-деформированного состояния и сопротивляемости хрупким разрушениям упруго-неоднородных стыковых сварных соединений : автореф. дис. к.т.н. – Челябинск, 1984. – 18 с.
2. Партон В. З. Механика упругопластического разрушения / В. З. Партон, Е. М. Морозов. – М. : Наука, 1985. – 502 с.

УДК 621.791 + 621.785.5

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИД. А. Зубко, info@1m63.ru

ООО «Русстанком», г. Екатеринбург, Россия

***Аннотация.** Плазменная закалка получила известность с 80-х гг. прошлого века, но ручному применению стала доступна только с разработкой специализированной установки УДГЗ-200 в 2002 г. Ручное ведение процесса сделало плазменную закалку применимой в тех случаях, когда другие виды закалки для применения неудобны и требуют значительных затрат. Плазменная закалка производится без сопутствующего охлаждения детали водой, что делает ее применимой не только в специализированных термических цехах, но и на участках механообработки или сборочных площадках. Слой плазменной закалки толщиной 0,5-1,5 мм существенно (многократно) увеличивает срок службы таких изделий как шестерни ($t \geq 5$), канатные блоки (одновременно снижая износ канатов), рельсы крановых путей, тормозные шкивы. Она эффективна для упрочнения обрубных и формовочных штампов, футеровочных плит приемных бункеров, контактных поверхностей корпусов прокатных клетей, массивных валов. Плазменная закалка установкой УДГЗ-200 производится, в том числе, по месту эксплуатации массивных деталей без их трудоемкого демонтажа.*

***Ключевые слова:** закалка, плазменная закалка, плазменная дуга, износостойкость, УДГЗ-200.*

Введение

Плазменная закалка представляет собой вид поверхностной закалки, которая традиционно осуществляется от нагрева газовым пламенем или токами высокой частоты (ТВЧ). Закалка названа «плазменной» от того, что нагрев в ней осуществляется плазменной дугой. Газовые грелки и индукторы ТВЧ довольно громоздки и тяжелы для ручного манипулирования, поэтому применяются преимущественно в механизированном варианте. Плазменная горелка, благодаря компактности, допускает проводить закалку там, где другие виды закалки применить затруднительно.

Установка УДГЗ-200

Установка для плазменной закалки УДГЗ-200 была разработана в 2002 г. в ООО «Композит» [1] и на настоящее время остается единственной в своем роде, выпускающейся серийно (<http://1m63.ru/katalog-stankov/UDGZ200>). В ее состав входит источник питания плазменной дуги, горелка закалочная, блок водяного охлаждения горелки. Технические характеристики установки УДГЗ-200: напряжение сети – 380 В, мощность – 10 кВт, производительность – 15-60 мм²/с, расход рабочего газа (аргона) – 250 мл/с.

При закалке сварщик перемещает дугу по поверхности со скоростью, обеспечивающей «вспотевание» (состояние предшествующее плавлению)

поверхности под дугой. Это контролировать не труднее, чем плавление при сварке, но оно обеспечивает необходимый для закалки нагрев, и не допускает оплавления поверхности с ухудшением ее шероховатости.

Работу на установке осваивают сварщики 2-3 разрядов. Дуга оставляет на поверхности закаленные полосы шириной 7-10 мм и глубиной 0,5-1,5 мм, которые сварщик располагает с некоторым перекрытием. Они окрашены «цветами побежалости», но не оказывают существенного влияния на шероховатость в диапазоне Rz 4-40. Плазменная закалка не дает деформаций, и во многих случаях деталям не требуются финишная шлифовка, что существенно снижает их трудоемкость и себестоимость.

Закалка происходит за счет отвода тепла в тело детали без подачи воды на место нагрева. Поэтому установка УДГЗ-200 применяется на ремонтных площадках, по месту механообработки и эксплуатации деталей, а не только в термических цехах и на специализированных участках [2, 3].

Свойства сталей с плазменной закалкой

Твердость увеличивается по мере увеличения в стали содержания углерода. Сталь 20ГЛ закаливается до твердости HRC35, сталь 45 – до твердости HRC50, 65Г – до HRC 60. По линии перекрытия закаленных полос происходит снижение твердости, однако оно далеко не всегда негативно сказывается на работоспособности закаленных деталей.

Плазменная закалка углеродистых конструкционных сталей, по сравнению с их «улучшением», обеспечивает более высокую твердость (до $HRC \geq 50$) и многократное превосходство в износостойкости без снижения коррозионной стойкости [4-9]. Штамповые стали представляют собой разновидность средне- и высокоуглеродистых легированных сталей. Обычно их упрочняют закалкой с отпуском. В процессе отпуска твердость штампов понижается, что уменьшает их стойкость. При плазменной закалке упрочняется тонкий поверхностный слой, который, как было установлено, выдерживает рабочие нагрузки без отпуска. Этим рабочим поверхностям штампов обеспечивается наибольшая твердость. Под слоем плазменной закалки располагается зона отпуска, в которой твердость несколько ниже. Этим обеспечивается демпфирование, что предупреждает отколы рабочей поверхности с максимальной твердостью [10-12].

Плазменная закалка в производстве

Размеры закалочной горелки установки УДГЗ-200 позволяют закаливать зубья шестерен с модулем $m \geq 5$. Закалка производится по боковой поверхности зуба. Впадины между зубьями не закаливаются. При закалке

ТВЧ это является недостатком, вызывающим поломки зубьев при эксплуатации. Но плазменная закалка боковых поверхности к поломкам не приводит, т. к. производится непрерывно-последовательно, тогда как закалка ТВЧ – одновременно по всему профилю, с наведением высоких остаточных напряжений. Закалка зубчатых колес сталеразливочного крана, рудоусреднительной машины, вагоноопрокидывателя и др. увеличивает их наработку в 2-4 раза [13].

В результате упрочнения плазменной закалкой многократно продлевается срок службы крановых рельсов и колес. При этом целесообразно подвергать закалке колеса после восстановления их наплавкой [14, 15].

Существуют детали, упрочнение которых традиционной термической обработкой затруднительно. Они, например, получают деформации, делающие невозможной их эксплуатацию, или их габариты не позволяют разместить их в закалочных печах или установках. Например, разрезные зубчатые муфты для буровых станков, футеровочные плиты бункеров, лицевые планки на прокатных клетях, оси молотковых дробилок и др. Во всех перечисленных и др. подобных случаях применение плазменной закалки устраняет имеющиеся затруднения [16-18].

На вагоностроительном заводе в связи с переходом на более прочную категорию металлопроката увеличился расход вырубных штампов (стали У8А, 5ХНМ, 5ХВ2С, Х12, 7Х3). В связи с этим применена плазменная закалка установкой УДГЗ-200, что дало увеличение их наработки в 1,5-5,3 раза [10]. Производилась плазменная закалка чугунных штампов формовки труб большого диаметра. В литом состоянии их твердость составляет HRC 30, которая газопламенной закалкой поднималась до HRC50. Применение плазменной закалки увеличило твердость до HRC 60, а стойкость – в 3 раза при одновременно уменьшении износа штампов, которые перестали быть причиной брака. При этом уменьшился износ вкладышей.

Многие штампы имеют длительный цикл изготовления с разрезанием на небольшие фрагменты для объемной закалки в печах и последующей трудоемкой подгонкой закаленных фрагментов в единое целое. Чтобы исключить трудоемкую подгонку, фрагменты штампа выполнили по чертежным размерам, а объемную закалку заменили плазменной. Плазменная закалка не вызвала искажений размеров, поэтому фрагменты собрались в единое целое без слесарной подгонки, что дало снижение себестоимости изготовления на 30 %. Эксплуатация штампа показала, что его

работоспособность улучшилась, т. к. трудоемкость ремонтных «зачисток» уменьшилась на порядок.

В настоящее время получило распространение восстановление посадочных отверстий в корпусных деталях мобильным наплавочно-расточным комплексом «Суперкомбината». Наплавка производится сварочной проволокой, в результате чего поверхность отверстий снижает твердость (до HB160) по сравнению с основным металлом (HB200), что ускоряет выход отверстий из строя. Этот недостаток устраняется плазменной закалкой, которая увеличивает твердость наплавленных отверстий до HB220-330 [19].

Плазменная закалка еще не стала широко распространенным процессом упрочнения, причиной чему, помимо прочего, является очевидное удорожание процесса изготовления деталей при неявной выгоде. В этом отношении надо иметь в виду, что у машиностроителей мотивом к применению плазменной закалки является ее более низкая себестоимость по сравнению с объемной или закалкой ТВЧ. Для потребителей запасных частей целесообразность ее применения заключается в сокращении их расхода (за счет увеличения долговечности) и сокращения ремонтных простоев [20].

Заключение

Закалка, как эффективное средство уменьшения износа, получила новые возможности с разработкой в 80-90-х гг. 20 в. способов ее выполнения плазменной дугой. Значительным событием в развитии плазменной закалки стала разработка в 2002 г. установки УДГЗ-200. Это единственная, выпускающаяся серийно, специализированная установка для плазменной закалки. Она сделала закалку доступной ручному применению, чем существенно расширила область ее применения.

Установка УДГЗ-200 может применяться на участках механообработки, что существенно сокращает логистику процесса производства деталей. Работу на ней осваивают сварщики 2-3 разрядов, как следствие, внедрение установки происходит без затруднений.

Закалка установкой УДГЗ-200 не приводит к существенному ухудшению шероховатости в диапазоне Rz 4-40, не дает деформаций, благодаря чему многие закаленные детали идут в эксплуатацию без финишной шлифовки. Это сокращает цикл изготовления деталей, снижает их себестоимость.

Твердый (HRC45-65) слой закалки (0,5-1,5 мм) многократно увеличивает срок службы: крановых рельсов, колес, зубчатых и шлицевых соединений,

канатных блоков, футеровочных плит, вырубных, формовочных, вытяжных штампов и проч.

Литература

1. Коротков В. А. Установка для ручной поверхностной закалки плазменной дугой / В. А. Коротков, С. В. Макаров // *Металлообработка*. – 2009. – № 5. – С. 43-46.
2. Коротков В. А. Исследование влияния скорости охлаждения на качество поверхностного слоя при плазменной закалке / В. А. Коротков, С. П. Ананьев, А. В. Шекуров // *Сварочное производство*. – 2012. – № 3. – С. 23-27.
3. Коротков В. А. Исследование влияния скорости охлаждения на структуру и механические свойства металла при плазменной закалке / В. А. Коротков, С. П. Ананьев, А. В. Шекуров // *Сварочное производство*. – 2013. – № 2. – С. 26-29.
4. Коротков В. А. Износостойкость материалов с плазменной закалкой // *Трение и износ*. – 2011. – Т. 32, № 1. – С. 23-29.
5. Коротков В. А. Исследование плазменной закалки конструкционной стали // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – 2013. – № 2. – С. 18-21.
6. Коротков В. А. Плазменная закалка зубчатых и шлицевых соединений / В. А. Коротков // *Вестник машиностроения*. – 2009. – № 8. – С. 87-89.
7. Коротков В. А. Влияние термической обработки на износостойкость сталей 45 и 40Х // *Вестник машиностроения*. – 2016. – № 8. – С. 48-51.
8. Коротков В. А. Влияние плазменной закалки на износостойкость стали 38ХС // *Трение и износ*. – 2017. – Т. 38, № 4. – С. 346-350.
9. Коротков В. А. Исследование среднеуглеродистой стали с плазменной закалкой на сопротивление износу и коррозии // *Механизация строительства*. – 2017. – Т. 78, № 4. – С. 57-60.
10. Злоказов М. В. Влияние плазменной закалки на износостойкость и структуру стали 7ХЗ / М. В. Злоказов, В. А. Коротков // *Технология машиностроения*. – 2016. – № 4. – С. 5-8.
11. Злоказов М. В. Влияние силы тока при ручной плазменной закалке на глубину и твердость упроченного слоя штампового инструмента / М. В. Злоказов, В. А. Коротков // *Сварочное производство*. – 2016. – № 9. – С. 39-42.
12. Влияние плазменной закалки на износостойкость стали 65Г / И. А. Растегаев, В. А. Коротков, М. А. Афанасьев [и др.] // *Заводская лаборатория*. – 2017. – Т. 83, № 5. – С. 62-65.
13. Коротков В. А. Плазменная закалка зубчатых и шлицевых соединений // *Вестник машиностроения*. – 2009. – № 8. – С. 87-89.
14. Плазменная закалка рельсовой стали / С. П. Ананьев, В. Я. Шур, Д. С. Чезганов [и др.] // *Вопросы материаловедения*. – 2014. – № 1 (77). – С. 20-28.
15. Коротков В. А. Плазменная закалка слоя наплавки 30ХГСА // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2015. – № 5. – С. 19-21.
16. Коротков В. А. Плазменная закалка деталей металлургического оборудования // *Металлург*. – 2014. – № 8. – С. 96-100.
17. Коротков В. А. Плазменная закалка контактных поверхностей на массивных изделиях // *Судостроение*. – 2014. – № 5 (816). – С. 30-33.

18. Коротков В. А. Исследование и применение плазменной закалки хромистой стали // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – № 7. – С. 46-48.
19. Голенков В. Н. Плазменная закалка корпусных частей оборудования // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 6. – С. 36-39.
20. Коротков В. А. Экономика износостойкости // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2012. – № 6. – С. 8-11.

УДК 622.692.4

ИЗМЕНЕНИЯ В МЕТАЛЛЕ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

И. Ф. Кантемиров¹, д-р техн. наук, st@rusoil.net

С. А. Сильвестров², silvestrovas@mail.ru

¹УГНТУ, г. Уфа, Россия

²ООО «Астрапроект», г. Казань, Россия

***Аннотация.** Приводятся анализ результатов изучения механизмов и закономерностей изменения свойств металла трубопроводов при длительной эксплуатации. Рассмотрены два основных механизма деградации свойств металла труб, которые получили название деформационного старения и наводороживания. Оба явления в условиях эксплуатации подземных трубопроводов приводят практически к одинаковым результатам, хотя и разными путями: металл труб постепенно теряет пластические свойства, охрупчивается и растрескивается.*

***Ключевые слова:** трубопровод, старение металла, наводороживание, деградация, охрупчивание, растрескивание, стресс-коррозия, дислокации, ударная вязкость.*

Трубопроводы в процессе длительной эксплуатации изнашиваются, стареют, их надежность и безопасность неуклонно снижаются. Процесс износа складывается из следующих явлений:

– изоляционное покрытие теряет адгезию, отслаивается от поверхности труб, охрупчивается, растрескивается;

– накапливаются дефекты на металле труб в виде коррозионных язв, царапин и усталостных трещин;

– появляются различные ремонтные конструкции в виде заварок, наплавов, приварок, которые часто создают концентрации напряжений;

–происходит перераспределение напряжений вдоль трубопровода, вызванное ремонтными работами, грунтовыми явлениями;

–изменяются механические свойства металла труб и сварных швов, например, снижаются пластичность и ударная вязкость.

Каждый из перечисленных факторов приводит к усилению действия всех других.

I. Впервые на проблему старения металла нефтепроводов обратил внимание проф. К. М. Ямалеев [1]. Он показал, что механические свойства сталей, используемых на магистральных нефтепроводах, в процессе длительной эксплуатации изменяются. Это явление получило название «старение металла труб». Старение выражается в том, что металл становится более хрупким, снижаются ударная вязкость КС, запас пластичности (относительное удлинение δ и относительное сужение ψ). Предел прочности σ_B практически не изменяется, а предел текучести σ_m даже несколько повышается.

Известно, что природа пластического деформирования металлов напрямую связана с генерацией и движением дислокаций. Дислокации, двигаясь внутри кристаллов, взаимодействуют с другими дислокациями, примесными атомами, вакансиями. При этом примесные атомы и вакансии переходят в другие положения, перегруппируются, увеличиваются внутрикристаллитные напряжения. Изменения претерпевают практически все структурные составляющие металла: феррит, перлит, цементит, зернограницные зоны. Атомы углерода, приходя в движение, выделяются из состава цементита и накапливаются на границах зерен. Вакансии постепенно объединяются и образуют микропустоты – зародыши микротрещин. Дислокации одинакового знака объединяются и образуют микротрещины. Перемещения дислокаций при микропластических деформациях приводят к структурным изменениям стали.

Деформационное старение протекает более интенсивно в напряженных областях, какими являются дефектные участки основного металла и сварные соединения. Размеры этих областей малы. Зачастую из этих областей невозможно вырезать стандартные образцы для механических испытаний. На бездефектных участках трубопровода эффект деформационного старения может быть незаметен. Это обстоятельство не должно вводить в заблуждение при изучении безопасности длительно эксплуатируемых нефтепроводов, так как разрушения происходят не на бездефектных участках.

II. Интересны исследования, проведенные в специализированной лаборатории «Трубнозор» [2], которая имела доступ ко всем магистральным газопроводам и проводила в массовом порядке испытания металла труб, вырезанных с разных участков разных трубопроводов. Ввиду массовости испытаний была возможность статистически обрабатывать результаты и, тем самым, получить объективные закономерности изменения металла труб в условиях значительных разбросов.

Испытания показали, что со временем происходит снижение пластических и вязких свойств. По сравнению с другими показателями (предел текучести, временное сопротивление) наиболее заметные изменения происходят с ударной вязкостью. На рис. 1 показано распределение ударной вязкости a_n металла труб размером 1020×12 мм из стали марки 14ГН.

Авторы пришли к выводу, что деградация определяется некоторой постоянной величиной, подобной периоду полураспада радиоактивных веществ, а сам процесс деградации описывается зависимостью вида $Y = Y_0 \cdot \exp(-b\tau)$, где Y_0 – начальное свойство объекта исследования; τ – время эксплуатации; b – постоянная процесса деградации, которая зависит от условий эксплуатации трубопровода, в том числе от нагрузок. Такой подход обоснован, так как деградация и распад имеют общие физические корни.

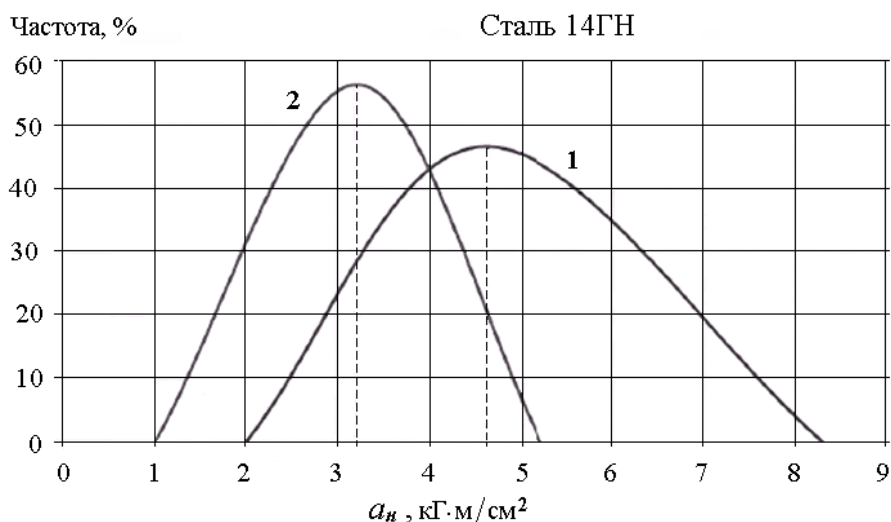


Рис. 1. Распределение ударной вязкости a_n при температуре 40 °С металла труб магистрального газопровода «Бухара-Урал» по сертификатным данным (1) и после 40 лет эксплуатации (2)

III. Интересны исследования, выполненные в УралНИТИ под руководством проф. Ю. И. Пашкова [3], где изучалось влияние постоянной нагрузки (внутреннего давления в трубе) на структуру и свойства стали 09Г2С. Результаты исследований позволили установить ряд закономерностей (рис. 2).

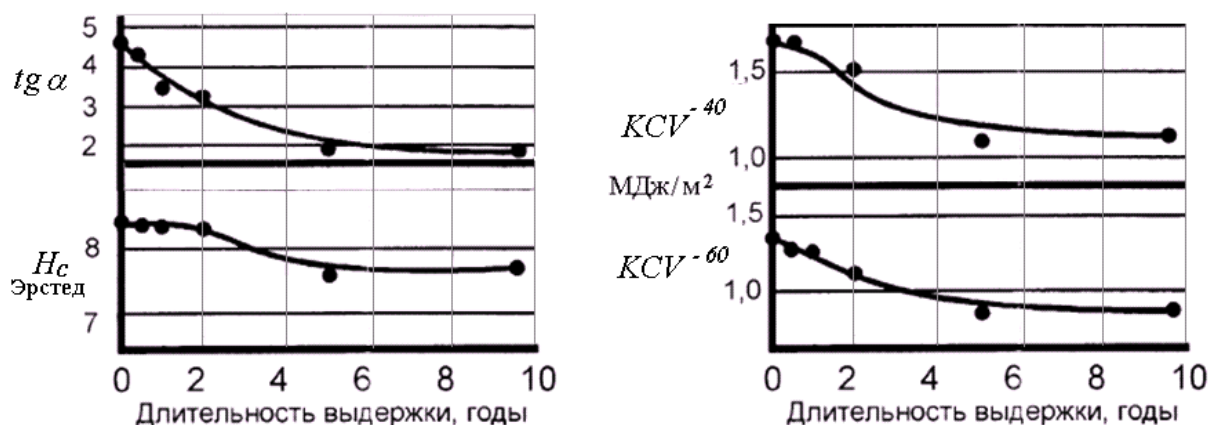


Рис. 2. Зависимость характеристик металла трубы от длительности выдержки под нагрузкой; $tg(\alpha)$ – характеристика внутреннего трения; H_c – коэрцитивная сила; KCV^{-40} и KCV^{-60} – ударной вязкости при -40 °C и -60 °C

В течение первых пяти лет произошло изменение внутреннего трения $tg(\alpha)$, что свидетельствует о снижении подвижности дислокаций. Это могло быть связано с закреплением дислокаций примесными атомами (C + N) и образованием атмосфер Коттрелла.

Коэрцитивная сила H_c под длительной нагрузкой имеет тенденцию к снижению. Это объясняется релаксацией внутренних напряжений при образовании примесных атмосфер на дислокациях.

IV. В рассмотренных выше работах не отмечается роль водорода. Также не были рассмотрены механизмы развития стресс-коррозии, которая в настоящее время является одной из основных причин разрушений магистральных газопроводов, но практически не наблюдается на магистральных нефтепроводах. Возникает естественный вопрос: не ожидает ли стресс-коррозия своего развития в будущем и на магистральных нефтепроводах? Чем принципиально отличаются магистральные газопроводы от нефтепроводов с точки зрения стресс-коррозии?

На эти вопросы нефтяники обычно отвечали так: магистральные газопроводы построены из высокопрочных сталей, которым свойственно явление стресс-коррозии. А на магистральных нефтепроводах стали обычные, типа 17Г1С, которые «не болеют» стресс-коррозией. Поэтому стресс-коррозия на магистральных нефтепроводах не развивается, следовательно, исследование этого явления неактуально.

Такое возражение слабо обосновано. Во-первых, на магистральных газопроводах также использовались стали типа 17Г1С, и на них происходит стресс-коррозия (коррозионное растрескивание под напряжением – КРН).

Во-вторых, в механизмах образования и развития КРН остается множество не изученных вопросов, требующих целенаправленных всесторонних исследований как «газовиками», так и «нефтяниками».

Между тем, в институтах ГУП «ИПТЭР» и УГНТУ в последние годы разработана физическая модель стресс-коррозии трубопроводов [4], которая проливает свет на поставленные вопросы. Физическая модель выражается следующими положениями:

1). Стресс-коррозия подземных трубопроводов связана с накоплением водорода в металле.

2). Водород проникает в металл извне (через внешнюю поверхность) в состоянии без электронной оболочки, то есть в виде ядер – протонов.

3). В такое состояние переходит только атомарный водород, образованный на поверхности трубы.

4). Существует несколько механизмов образования атомарного водорода на поверхности трубы.

5). Универсальный источник водорода – грунтовая вода, в которой катионы водорода H^+ устремляются к поверхности трубы под влиянием отрицательного электрического потенциала, подаваемого трубопроводу системой электрохимической защиты. Такой процесс происходит в местах, где изоляционное покрытие потеряло адгезию к поверхности металла трубы.

6) На поверхности металла трубы катионы H^+ получают недостающий электрон и тем самым восстанавливаются до нейтрального состояния (атома H). Однако, находясь в электрическом поле приповерхностного слоя металла, протоны увлекаются вглубь металла.

7). Могут быть и другие источники водорода, связанные с химическим взаимодействием металла трубы с примесями, содержащимися в продукте перекачки. Примером такого взаимодействия является реакция сероводорода с металлом.

8). Интенсивность проникновения атомарного водорода (протонов – ядер атомов водорода) в металл повышается при наличии в металле растягивающих механических напряжений. Чем выше рабочее давление, тем интенсивнее водород проникает в стенку трубы.

8). Существует определенный уровень растягивающих напряжений, ниже которого проникновение водорода в металл замедляется. Это предельное напряжения следует называть пределом стресс-коррозии, подобно другим пределам (текучести, упругости, прочности, усталости, трещиностойкости).

9). На участках трубопровода, где повреждено или отсутствует изоляционное покрытие и одновременно образуется концентрация напряжений (например, сварные стыки или дефекты), можно ожидать ускоренной реакции наводороживания металла, что и наблюдается на практике.

10). Водород, проникший в металл, вступает в реакции с образованием молекул водорода H_2 и молекул метана CH_4 . Эти молекулы накапливаются в зернограницных микропорах, создавая тем самым высокие внутренние напряжения в металле.

11) Новые образования в виде молекул H_2 и CH_4 снижают подвижность дислокаций, тем самым снижают пластичность металла. Появляется хрупкость.

12). При достижении определенных суммарных напряжений (внутренних + внешних) происходит образование и рост микротрещин, которые постепенно вырастают до размеров макротрещин и приводят к разрушению.

Такая физическая модель позволяет сделать следующие важные выводы:

1). Для торможения растрескивания трубопроводов необходимо исключить источники атомарного водорода на поверхности металла труб, либо снизить рабочие напряжения ниже предела стресс-коррозии.

2). Электрохимическая защита трубопроводов не может замедлить коррозионное растрескивание. Наоборот, чем выше потенциал «труба-земля», тем быстрее металл насыщается водородом и наступает разрушение.

3). На магистральных газопроводах рабочие напряжения находятся на уровне предела стресс-коррозии. Этим объясняется интенсивное развитие стресс-коррозии на магистральных газопроводах.

4). На магистральных нефтепроводах рабочие напряжения ниже. Однако на сварных соединениях и на дефектах с учетом концентрации напряжений предел стресс-коррозии может быть достигнут. Поэтому на магистральных нефтепроводах стресс-коррозия на больших площадях не отмечается, но локальная стресс-коррозия вполне возможна.

5). Для исключения наводороживания металла подземного трубопровода необходимо применять такие изоляционные материалы, у которых адгезия к металлу со временем не уменьшается. Для этого изоляционный материал должен химически взаимодействовать с металлом, создавая дополнительную защитную пленку (аналогично алюминию, который покрывает себя прочной защитной окисной пленкой). Примером такого материала является асфальт.

Предложенная модель стресс-коррозии проверена экспериментально. Металлографические исследования показали, что в окрестности стресс-коррозионных трещин появляются участки, где наблюдается обезуглероживание и рост зерен. Это является свидетельством активного ухода атомов углерода из зерен в зернограничные области с образованием молекул метана.

Модель также апробирована на множестве аварийных ситуаций на магистральных газопроводах. На магистральных нефтепроводах также обнаружались случаи разрушения от локальной стресс-коррозии. Проверены также методы защиты от стресс-коррозии.

Литература

1. Ямалеев К. М. Старение металла труб в процессе эксплуатации нефтепроводов. – М. : ВНИИЭЭНГ, 1990. – 64 с.
2. Остаточный ресурс металла труб газопроводов, введенных в эксплуатацию в 60-е годы / Ф. Е. Сметанин, В. В. Кудрявцев, М. В. Демаков [и др.] // Проблемы старения сталей магистральных газопроводов : сб. тр. науч.-технич. семинара. – Н. Новгород : Университетская книга, 2006. – С. 220-131.
3. Пашков Ю. И. Инженерные методы оценки работоспособности сварных труб. – Челябинск : МД «ММ», 2014. – 463 с.
4. Гумеров К. М. Физическая модель стресс-коррозии трубопроводов / К. М. Гумеров, С. А. Сильвестров, Р. Р. Багманов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов / ИПТЭР. – 2015. – Вып. 4 (102). – С. 82-95.

УДК 621.791

УПРОЧНЯЮЩЕЕ ТОНКОПЛЕНОЧНОЕ ПОКРЫТИЕВ. А. Коротков, д-р техн. наук, vk@udgz.ru

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил, Россия

Аннотация. Рассмотрено получение плазменного тонкопленочного покрытия (ПТП), увеличивающего срок службы инструмента, подобно покрытиям, наносимым установками «Булат». Оно наносится на холодную поверхность. Это позволяет упрочнять им инструмент из углеродистых сталей, тогда как напыление на установках «Булат» приводит к разупрочнению углеродистых сталей из-за высокой температуры нагрева и не дает эффекта.

Ключевые слова: плазма, тонкие покрытия, плазменные тонкопленочные покрытия, изнашивание инструмента, долговечность.

При трении на поверхности тел образуются вторичные структуры, своего рода тонкие покрытия. Благодаря чему, чистые атомы трущихся деталей не вступают в соприкосновение, что замедляет процесс изнашивания [1]. В середине 20-х гг. 20 в. химик фирмы «Compagnie Francaise de Raffinage» P. Woog разработал состав, названный им «Epilame» (эпилам), более известный как «стеариновая кислота». Его еще до начала трения наносят на поверхности. На них он располагается тонким (невидимым) слоем, но этого оказывается достаточно для предупреждения схватывания поверхностей и уменьшения коэффициента трения. Составы, подобные стеариновой кислоте, называют поверхностно-активными веществами (ПАВ). Их применение увеличивают срок службы приборов часового типа, компрессоров, насосов и пр. [2]. В середине 70-х гг. в Харьковском физико-техническом институте была разработана технология КИБ (катодная ионная бомбардировка) и установка «Булат» для напыления покрытия из нитрида титана (0,5-0,8 мкм) вакуумно-дуговым методом. Применение КИБ многократно увеличивает срок службы инструмента из быстрорежущей стали, но она неэффективна на инструменте из углеродистой стали, которая при температуре процесса КИБ (~550 °С) теряет твердость. Проблема упрочнения инструмента из углеродистых сталей тонкими покрытиями была решена в середине 80-х гг. в Ленинградском политехническом институте. Там разработали нанесение плазменного тонкопленочного покрытия (ПТП) на холодный инструмент с применением сварочного плазматрона [3]. Важным преимуществом этого процесса было то, что он осуществлялся на воздухе, а не в дорогостоящей вакуумной камере, как технология КИБ. При этом результаты его применения были сопоставимы с технологией КИБ [4].

В начале 90-х гг. документация на технологию ПТП была приобретена ООО «Композит». Исследования рентгено-электронной спектроскопией [5] показали, что на основании значений энергии связи кремния и кислорода (рис. 1) преобладающей составляющей в объеме тонкопленочного покрытия может быть диоксид кремния (SiO_2).

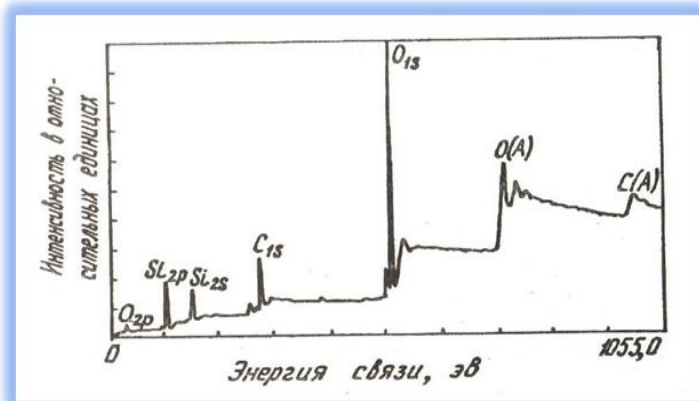


Рис.1. Обзорный спектр плазменного тонкопленочного покрытия

Было так же установлено, что микротвердость поверхности, покрытой ПТП, пропорционально зависит от микротвердости основы, на которую производилось напыление (табл. 1).

Табл. 1. Влияние ПТП на твердость стальной поверхности

Исходная микротвердость поверхности, HV	430	480	510	700	860
Микротвердость поверхности с покрытием, HV	430	510	560	890	1060

Некоторые результаты сравнительных испытаний инструмента, упрочненного ПТП, приведены в табл. 2.

Табл. 2. Влияние ПТП на долговечность инструмента

Инструмент	Обрабатываемая деталь	Увеличение стойкости
Метчик M12. P6M5	Вагонная ось	3 раза
Развертка d 6,5 мм. 9XC	Корпус из силумина	5 раз
Фреза стоматолога. P18	Коронка зубная	8 раз
Фреза дисковая. P18	Шина бензопилы. HRC 45	7 раз
Пробойник d3,42 мм. X12M	Оцинкованный лист, S 0,7мм	22 раза

По ней видно, что покрытие значительно (многократно) увеличивает износостойкость как инструмента из быстрорежущей стали (P18 и P6M5), так

и инструмента из углеродистой и хромистой марок инструментальной стали. Особенно высокий эффект (в 22 раза) получен при упрочнении инструмента, работающего с оцинкованным листом.

В 2018 г. была возобновлена работа установки по нанесению ПТП. Одним из перспективных направлений ее применения рассматривается нанесение покрытий на фрезы, используемые при двухстороннем фрезеровании заготовок из цветных сплавов перед холодной прокаткой их в полосу. Налипание металла на рабочие кромки фрез ухудшает чистоту обрабатываемых поверхностей, что сказывается на качестве выпускаемых полос [6]. Нанесение ПТП позволит уменьшить налипание и повысить качество готовой полосной продукции.

Литература

1. Костецкий Б. И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания // Трение и износ. – 1980. – № 4. – С. 622-637.
2. Семенов А. П. О роли эпиламов в трибологии // Трение и износ. – 2010. – Т.31, № 6. – С. 612-626.
3. Тополянский Г. Л. Нанесение износостойких покрытий с использованием установки для плазменной сварки / Г. Л. Тополянский, Н. А. Соснин // Сварочное производство. – 1989. – № 5. – С. 30-31.
4. Сравнительный анализ свойств износостойких покрытий для повышения стойкости сверл / П. А. Тополянский, С. А. Ермаков, Н. А. Соснин [и др.] // Металлообработка. – 2013. – № 4 (76). – С. 28-39.
5. Коротков В. А. Восстановление и упрочнение деталей и инструмента плазменными технологиями / В. А. Коротков, А. А. Бердников, И. А. Толстов // Челябинск : Металл, 1993. – 144 с.
6. О совершенствовании фрезерования цветного проката / М. З. Певзнер, Ю. Л. Апатов, Д. О. Виноградов [и др.] // Механическое оборудование металлургических заводов. – 2017. – №2 (9). – С. 59-66.

УДК 320.47:001.891.573:621.9.048

УПРОЧНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТЫ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ПРИМЕРЕ СТАЛИ 09Г2С

С. Г. Купцов, канд. техн. наук, matu@mail.ruВ. П. Плещев, vple64@mail.ru

Р. С. Магомедова, канд. техн. наук

В. В. Шимов, канд. техн. наук

УрФУ, г. Екатеринбург, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования конструкционной низколегированной стали марки 09Г2С с целью повышения ее эксплуатационной надежности.

Ключевые слова: упрочнение, наклеп, электроискровое легирование, сталь 09Г2С, эксплуатационная надежность.

Постановка задачи

Сопротивление технологических деталей износу при трении зачастую является определяющим фактором надежности деталей машин при эксплуатации, значит модификация трущихся поверхностей с целью повышения твердости значительно влияет на их износоустойчивость.

Описание методик эксперимента

В работе для увеличения сопротивлению износу при трении применены наклеп и электроискровое легирование (ЭИЛ) твердым сплавом ВК8 как по отдельности, так и в совместном (гибридном) использовании для решения вышеуказанной задачи [1÷3].

Для наклепа авторы использовали прокатку на прокатном стане MDM GL 200 NEW (Mario Di Maio) на валках с качеством рабочей поверхности класса Ra = 0,1. Результаты приведены в табл. 1.

Табл. 1. Данные образцов после деформации

	№	1	2	3
Начальная высота полосы	H0, мм	2.00	2.00	2.00
Конечная высота полосы	H1, мм	1.70	1.60	1.50
Конечная ширина полосы	B1, мм	18.00	20.00	20.50
Конечная длина полосы	L1, мм	77.00	80.00	90.00
Радиус валков	R, мм	100.00	100.00	100.00
Коэффициент трения	m	0.30	0.30	0.30
Абсолютное обжатие	Δh , мм	0.30	0.40	0.50

Степень деформации	ε	0.15	0.20	0.25
Степень деформации, %	$\varepsilon\%$	15.00	20.00	25.00
Длина дуги захвата	Lд, мм	5.48	6.33	7.07
Средняя высота очага деформации	h _{ср} , мм	1.85	1.80	1.75
Фактор формы очага деформации	l/h _{ср}	2.96	3.52	4.04
Угол захвата	α , рад	0.05	0.06	0.07
Начальное сопротивление деформации	σ_0 , МПа	313.60	312.00	312.00
Конечное сопротивление деформации	σ_1 , МПа	514.55	542.98	567.77
Среднее сопротивление деформации	$\sigma_{ср}$, Мпа	414.07	427.49	439.88
Среднее давление на валки	P, МПа	589.25	426.69	464.86
Усилие прокатки	P, кН	57.73	54.02	67.37
Предел прочности	σ , МПа	534.33	556.40	577.96
Твердость	НВ	203.98	212.01	219.73

Измерение шероховатости производилась на приборе фирмы Wadowickie Przedilbios + WO Produk.

Упрочнение (ЭИЛ) проводилось на установке «Элитрон – 52А» при различных режимах (табл. 2).

Табл. 2. Упрочнение образцов

Образец №	1	2	3	4
Режим нанесения покрытия	ТТ6	РС-1	ТТ6	РС-1
Масса после нанесения покрытия, г	16,2734	15,3637	18,2816	19,1512

Микротвердость определялась по стандартной методике на приборе ПМТ-3.

Измерение износостойкости производилось на установке Хаварда-Бринеля. В качестве абразива использовался речной песок крупностью 0,1-0.5 мм.

Во всех случаях экспериментальные исследования проводились на пластинах из конструкционной стали 09Г2С размером (65×20×2) мм.

Экспериментальные результаты

Шероховатость образцов до наклепа до ЭИЛ составила:

$$\Delta_1 = (43 \pm 2) \text{ мкм},$$

после наклепа (15 % обжатия): $\Delta_2 = (35 \pm 8) \text{ мкм}$; (20 % обжатия):

$$\Delta_3 = (20 \pm 3) \text{ мкм}; (25 \% \text{ обжатия}): \Delta_4 = (11 \pm 3) \text{ мкм}.$$

Табл. 3. Данные после нанесения покрытия

Образец №	1	2	3	4
Режим нанесения покрытия	RC-1	RC-2	RC-3	TT3
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

Табл. 4. Изменение массы образцов после испытаний

№ испытания	1	2	3	4	К*
Изменение массы, г	-0,296	-0,1764	-0,1598	-0,417	-0,578

К* – контрольный образец без покрытия.

На основании метода наименьших квадратов получено уравнение, описывающее зависимость износа металла от времени испытания:

$y = kx + b$, где k – тангенс угла наклона, b – отрезок прямой до оси y , y – износ металл (граммы), x – время (секунды), k – принят авторами за критерий износа.

Кинетика изменения массы образцов во время испытаний на износ имеет вид:

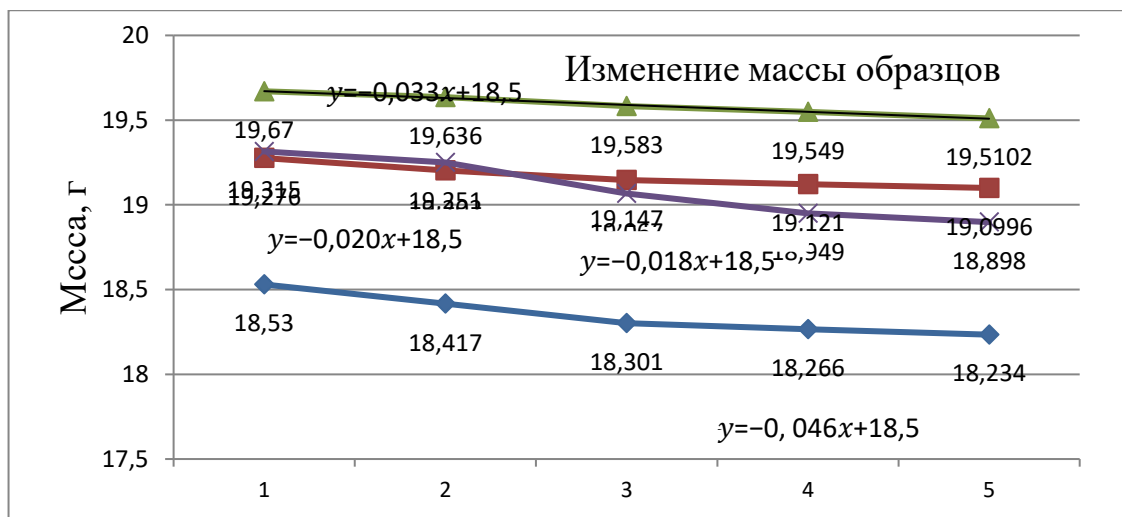


Рис. 1. Изменение массы образцов

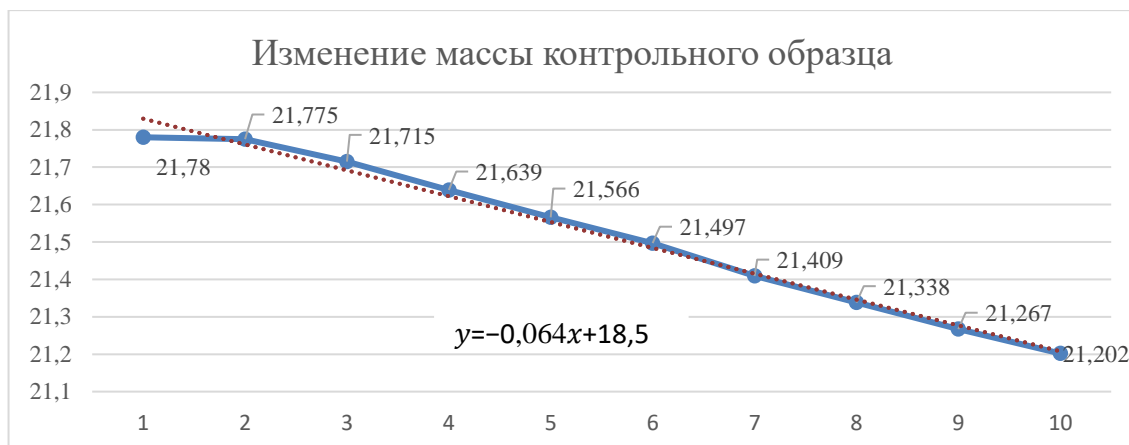


Рис. 2. Изменение массы контрольного образца

Исследование микротвердости образцов

Микротвердость образцов составила: № 1 – (4200 ± 700) МПа, № 2 – (1800 ± 300) МПа, № 3 – (3300 ± 100) МПа, № 4 – (2800 ± 300) МПа, основного металла – (1300 ± 200) МПа.

Выводы

Применение ЭИЛ увеличивает сопротивление трению практически во всех случаях (рис. 1, 2), причем образец 2, упрочненный по режиму РС-1 и деформированный на 20 %, показал увеличение износоустойчивости трению в $\approx 3,5$ раза. Графики (рис. 1) подтверждают, что сказанное можно объяснить увеличением микротвердости. Повышение толщины покрытия не коррелируется (табл. 1) с повышением износостойкости, что можно объяснить шероховатостью покрытий, а также влиянием подложки до покрытия после наклепа.

Можно сделать вывод, что совместное (гибридное) применение используемых в работе методов упрочнения (наклеп, ЭИЛ) сложным образом влияет на износоустойчивость поверхности технологических деталей, а значит, их использование как совместно, так и по отдельности может широко применяться для повышения надежности технологических деталей против износа в условиях трения.

Литература

1. Верхотуров А. Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А. Д. Верхотуров, Н. И. Муха. – Киев : Техника, 1982. – 181 с.
2. Иванов Г. П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. – М. : Машгиз, 1957. – 303 с.
3. Шак А. В. Методическое руководство по работе с системой пробоподготовки : методическое руководство. – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. – 58 с.

УДК 621.785.5

КАРБОНИТРАЦИЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ ПРОТЯЖНОГО СТАНКА

В. Н. Максимов, st@udgz.ru

ООО «Композит», г. Нижний Тагил, Россия

***Аннотация.** Направляющие протяжного станка изготавливаются из дорогостоящей хромистой (Cr 13 %) стали. Их упрочняют объемной закалкой, сопровождающейся деформациями изгиба, которые устраняются шлифовкой предусмотренных для этого завышенных припусков. Известным способом снижения трудоемкости механообработки, в подобных случаях, является применение финишных технологий упрочнения, когда весь объем механообработки ведется по неупрочненному металлу. В качестве финишной технологии упрочнения была выбрана карбонитрация. Поскольку карбонитрация создает на поверхности слой карбонитрида, превышающий по твердости закаленный металл, то одновременно с применением карбонитрации провели замену дорогостоящей хромистой стали экономичной конструкционной сталью 40Х. Эти меры дали сокращение себестоимости производства, что позволило пройти конкурсные процедуры на поставку направляющих с преимуществом в 2-3 раза.*

***Ключевые слова:** протяжный станок, направляющие станка, объемная закалка, карбонитрация.*

Ведение

Направляющие (сталь Cr 13 %) на Нижне-Салдинском металлургическом заводе устанавливаются комплектом из 10 штук в два ряда по 5 штук на станину протяжных станков RKW фирмы «Hofman». По ним на цепной передаче перемещаются 15 тележек с рельсовыми скреплениями, которые одновременно обрабатываются инструментом. Направляющие испытывают кроме износа трением, износ попадающей под них стружки. Допускаемый износ 0,3 мм, но практически – до 1,0 мм. Направляющие, поставляемые из Германии, отличались высокой ценой. Поставленные из Санкт-Петербурга и Уфалея оказались ниже в цене, но имели остаточный изгиб и трещины, появляющиеся при объемной закалке и последующей шлифовке. Рассмотрена разработка экономичной импортозамещающей технологии изготовления направляющих протяжного станка с применением карбонитрации.

Выбор карбонитрации для упрочнения направляющих

Базовая технология изготовления направляющих включает отжиг для уменьшения твердости перед механообработкой, которая выполняется с повышенным припуском на устранение изгиба (получается при закалке) при чистовой шлифовке. Затем следует закалка с отпуском и шлифовка.

Карбонитрация, разработанная в 70-х гг. в Советском Союзе [1] создает на поверхности слой высокой твердости, что многократно увеличивает износостойкость конструкционной стали [2]. Твердость карбонитрированных деталей можно измерять ультразвуковыми твердомерами типа УЗИТ-3, что делает доступным 100 %-ный контроль качества. Карбонитрация не дает деформаций и может применяться в качестве финишной обработки, что сокращает технологический процесс изготовления в целом [3-5]. По совокупности изложенного была сформулирована гипотеза о возможности замены при изготовлении направляющих протяжного станка высокохромистой закаленной стали конструкционной сталью 40Х, упрочненной карбонитрацией.

Техпроцесс изготовления направляющих и производственные испытания

В ноябре 2008 г. в ОАО «СМЗ» изготовили опытные комплекты направляющих из нормализованной стали 7ХГ2ВМФ уменьшенной от 1700 мм до 700-1000 мм длины, исходя из возможностей имеющегося шлифовального станка. Вместо объемной закалки направляющим была выполнена карбонитрация (HRC 55-59) в ООО «Композит». Интенсивность изнашивания в течении 42 месяцев составила 0,010 мм/мес. Было установлено, что уменьшение длины направляющих негативно сказалось на точности обработки рельсовых креплений. Все последующие комплекты изготавливались нормативной длины 1700 мм из стали 40Х (HB 230). Замена марки стали привела к снижению твердости карбонитрированной поверхности до HRC 50-55 и увеличению интенсивности изнашивания до 0,017 мм/мес. Износ крайних направляющих в станке в 1,5-2 раза меньше находящихся в средней части станка, т. к. они меньше времени участвуют в работе. В целом опытные комплекты оказались в системе «цена-качество» более предпочтительными импортным комплектам из закаленной высокохромистой стали.

Первый длинномерный комплект направляющих после 12 месяцев был снят с повышенным износом 0,20 мм. После повторной карбонитрации комплект отработал нормативный срок 50-60 месяцев. Вероятная причина быстрого износа состоит в недостаточной толщине упрочненного слоя из-за быстрого охлаждения ванны в момент опускания направляющих. В дальнейшем ванна перед опусканием направляющих перегревалась до 600 °С, чтобы при опускании в нее направляющих, температура ванны принимала нормативное значение 570 °С.

При глубине ванны 900 мм направляющие длиной 1700 мм карбонитрировались за два приема: сначала с одного конца, а затем кантовались на 180 градусов и опускались в ванну другим концом.

Всего с 2008 г. на основании конкурсных процедур по новой технологии было поставлено 11 комплектов карбонитрированных направляющих для протяжного станка.

Заключение

Применение карбонитрации при изготовлении направляющих протяжного станка позволило:

- уменьшить припуски на механообработку, т. к. не стало деформаций изгиба в ходе термического упрочнения, что повлекло сокращение расхода металла и трудоемкости шлифовки – наиболее затратной операции;
- выиграть конкуренцию в системе «цена-качество» у дорогостоящих направляющих из закаленной высокохромистой стали.

Литература

1. Прокошкин Д. А. Химико-термическая обработка металлов – карбонитрация. – М. : Машиностроение : Metallurgia, 1984. – 240 с.
2. Коротков В. А. Износостойкость углеродистых сталей с различными видами упрочнения // Трение и износ. – 2015. – № 2. – С. 196-200.
3. Коротков В. А. Исследование процесса карбонитрации // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 8. – С. 11-14.
4. Коротков В. А. Карбонитрация как средство снижения износа деталей металлургического оборудования // Metallurg. – 2015. – № 12. – С. 63-68.
5. Коротков В. А. Техничко-экономическая эффективность карбонитрации // Вестник машиностроения. – 2017. – № 9. – С. 68-71.

УДК 620.1

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА КАК ВАЖНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

Д. Л. Мерсон, д-р физ.-мат. наук, d.merson@tltsu.ru

А. А. Караванова, канд. техн. наук, akaravanova@yandex.ru

ТГУ, г. Тольятти, Россия

***Аннотация.** В статье раскрывается важная роль испытаний и исследований в обеспечении надлежащего качества выпускаемой продукции. Показано, что проведение качественной металлографической экспертизы позволяет своевременно внести коррективы в существующие технологические процессы изготовления продукции с целью недопущения в будущем их преждевременного выхода из строя. Приводятся конкретные примеры проведения экспертных работ, выполненных на базе Научно-исследовательского института прогрессивных технологий Тольяттинского государственного университета.*

***Ключевые слова:** металлографическая экспертиза, микроструктура, трещины, эффект Ребиндера.*

При производстве изделий и их эксплуатации очень часто возникает потребность проведения различных испытаний и исследований для оценки качества материалов, из которых они были изготовлены, качества проведения технологических операций, а также выяснения причин возникновения дефектов или выхода изделий из строя. Такие работы проводят в «испытательных» или «независимых испытательных» лабораториях. Первые из них предназначены для: входного контроля исходного сырья; выявления причин появления брака в процессе производства, контроля показателей качества готовой продукции; а вторые – для: разрешения споров по качеству поставляемого на предприятие сырья или разбирательств по претензиям заказчиков, в том числе, определение причин разрушения изделий.

Это очень важная и ответственная работа, позволяющая, с одной стороны, обеспечивать надлежащее качество выпускаемой продукции, а, с другой стороны, вносить необходимые коррективы в технологию ее изготовления для недопущения брака и преждевременного выхода из строя. Поэтому такую работу могут осуществлять только аккредитованные организации, имеющие в своем распоряжении современное испытательное и исследовательское оборудование, опытные квалифицированные кадры, а также необходимое методическое обеспечение.

Научно-исследовательский институт прогрессивных технологий (НИИПТ) Тольяттинского государственного университета, без всякого преувеличения, является лидером в Самарской области по проведению

указанных выше работ, которые он осуществляет на долгосрочной основе более чем со ста предприятиями со всей страны, в том числе металлургической, машиностроительной, автомобилестроительной и нефтехимической отраслей, а также системы ОАО «РЖД».

НИИПТ оснащен самым современным испытательным и исследовательским оборудованием и в настоящее время аккредитован в Единой системе оценки соответствия на объектах, подконтрольных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, и в Ассоциации аналитических Центров «Аналитика», являющейся полноправным членом и участником Соглашений о взаимном признании Международной системы ILAC и APLAC. Заключение лабораторий, аккредитованных в указанной системе, признаются всеми развитыми странами Мира.

Об объемах, выполняемых НИИПТ в области испытаний и экспертиз, красноречиво говорит тот факт, что в 2018 г. специалистами НИИПТ было подготовлено более 1500 протоколов всевозможных испытаний и около 20 металлографических экспертиз по выявлению причин разрушения различных объектов, в том числе ответственных.

НИИПТ является одной из ведущих независимых экспертных организаций, работающих в области анализа причин разрушения объектов инфраструктуры ОАО «РЖД», поэтому в данной статье пойдет речь о наиболее интересных в научном и практическом плане экспертных работах, выполненных именно на таких объектах.

Анализ причины разрушения бандажа колесной пары локомотива

Разрушение бандажа колесной пары локомотива, выполняющего роль износостойкой шины, может привести к сходу поезда с путей и поэтому относится к чрезвычайным происшествиям, а каждый такой случай подлежит расследованию с обязательным проведением металлографической экспертизы. Причины разрушения бандажей могут быть разные: недостаточная чистота металла по неметаллическим включениям; отклонение микроструктуры и механических свойств от заданных; неправильная геометрия гребня и др. [1]. Установление причины разрушения конкретного бандажа – это очень ответственная и важная работа, на основании которой делаются соответствующие выводы и разрабатывается план мероприятий об их недопущении в будущем.

В рассматриваемом случае на экспертизу поступил бандаж с полным разрушением, излом которого показан на рис. 1. На изломе можно отметить наличие скола на вершине гребня и зону с более мелкодисперсной структурой вблизи поверхности катания (на рис. 1 выделена пунктирной линией). По характерным ручьистым узорам было достаточно легко установить направление развития разрушения (на рис. 1 отмечено белыми стрелками) и, что очаг разрушения находился на вершине гребня.

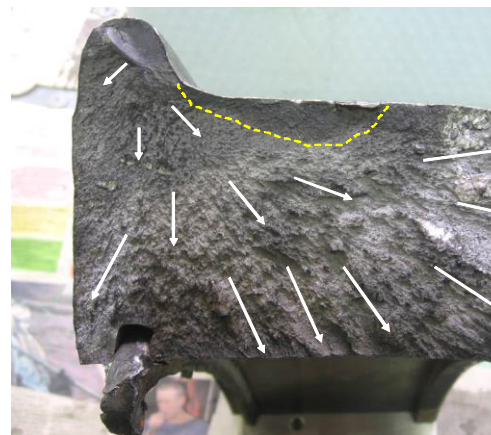


Рис.1. Излом бандажа колесной пары. Пунктирной линией выделена область с более мелкодисперсной структурой близ поверхности катания. Стрелки указывают направление развития разрушения

Проведенный комплекс стандартных исследований качества металла бандажа (химический анализ, наличие неметаллических включений, твердость и ударная вязкость) показали его полное соответствие нормативной документации. Для ответа на вопрос, по какой причине произошел скол металла на вершине гребня, было проведено подробное исследование внутренней структуры гребня.

Прежде всего было отмечено, что на поверхности гребня по всему диаметру бандажа присутствует значительная выработка металла в виде борозд (рис. 2), которая, очевидно, образовалась в результате взаимодействия гребневой колодки с бандажом: продукты износа тормозной колодки по какой-то причине не уносились из зоны трения и послужили в качестве абразива.



Рис. 2. Борозды (выработка металла) на гребне бандажа из-за неправильной работы тормозной колодки

Исследование поперечного шлифа гребня показало, что на дне борозды, как на концентраторе напряжений, могут образовываться микротрещины, расположенные параллельно поверхности (рис. 3а). Образование таких трещин на поверхности катания достаточно распространенное и считающееся нормальным явление: в результате постоянного взаимодействия поверхности катания бандажа с рельсами по зародившимся микротрещинам происходит отрыв частичек (чешуек) металла и таким

образом реализуется «нормальный» износ бандажа. Т. е. возникающие микротрещины успевают исчезнуть еще до того, как переродиться в макротрещину.

Другое дело, что гребень бандажа не взаимодействует с рельсами, поэтому зародившейся микротрещине (рис. 3а) ничего не мешает продолжить свое движение, например, как следует из рис. 3б, повернуть вглубь материала, привести к сколу вершины гребня и к полному разрушению бандажа.

Таким образом, в данном случае причиной разрушения бандажа является неправильное взаимодействие тормозной колодки с гребнем бандажа. Действительно, исследование тормозной колодки показало, что качество ее изготовления не соответствовало требованиям нормативной документации.

Анализ причины разрушения оси колесной пары локомотива

Другим примером металлографической экспертизы служит анализ причины разрушения оси колесной пары локомотива (рис. 4), что является достаточно редким случаем.

Поверхность излома по всему сечению имела цвета побежалости, появляющиеся на стали при ее нагреве свыше температуры 300 °С, а также желтоватый оттенок, что свидетельствует о ее контакте с медью латунного вкладыша моторно-осевого подшипника (МОП), которая могла попасть в сечение только в связи с расплавлением вкладыша. Боковая поверхность оси в зоне расположения МОП имеет круговые дорожки трения с пятнами залипания в пределах дорожки, на которых также были обнаружены цвета побежалости и желтоватые следы налипания меди латунного вкладыша МОП.

Данные визуального осмотра однозначно указывали на то, что еще до излома оси в левом МОП уже происходил катастрофический износ, что может быть следствием недостаточного количества смазочного материала. Зародышей разрушения в виде металлургических дефектов в изломе не

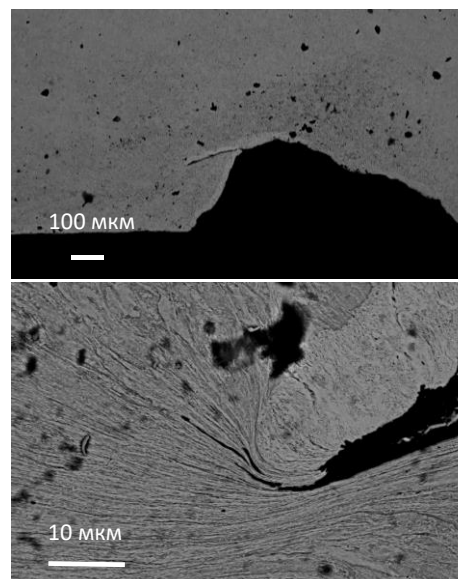


Рис. 3. Микротрещина на дне бороздки (а) и кончик трещины в увеличенном масштабе (б)

обнаружено, поэтому выявленные продольные и поперечные трещины могли возникнуть только во время эксплуатации. При этом наиболее опасными являлись поперечные трещины, по которым и произошло разрушение.

Во время катастрофического износа происходит неравномерное охлаждение по сечению оси, что может вызвать термоциклическую усталость, а залипание оси неизбежно приводит к повышению касательных напряжений в сечении. Расплав баббита растекаясь по поверхности оси может вызывать жидкокристаллическое охрупчивание, так называемый эффект Ребиндера [2].

Макроскопический анализ макрошлифа после горячего травления показал, что от поверхности вглубь металла отходит множество микро- и макротрещин (рис. 5а), а торец (боковая поверхность оси) буквально испещрен трещинами (рис 5б).

С целью выявления природы образования микротрещин вблизи поверхности оси с помощью растрового электронного микроскопа были сняты рентгеновские спектры в устье трещины (рис. 6а) и вне ее (рис. 6б). Оказалось, что трещина заполнена материалом, содержащим олово, сурьму (вероятно следы баббита) и медь, цинк (вероятно следы латуни).

Таким образом, рентгеноструктурный микроанализ однозначно указывает на то, что в устье всех трещин присутствует застывший расплав легкоплавких элементов, тогда как в основном металле их наличие не обнаружено, что полностью подтверждает гипотезу жидкометаллического



Рис. 4. Вид излома оси колесной пары



Рис. 5. Трещины, вскрывшиеся после горячего травления в поперечном сечении (а) и снаружи оси (б)

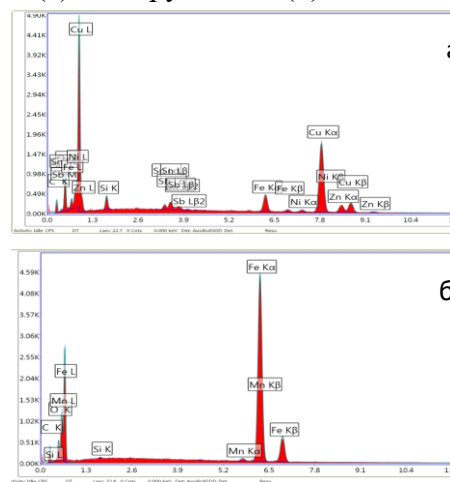


Рис. 6. Рентгеновские спектры в устье трещины (а) и вне ее (б)

охрупчивания [2].

Приведенные выше примеры металлографических экспертиз помогли выявить проблемные места в работе узлов железнодорожного транспорта и наметить мероприятия по их устранению.

Литература

1. Брюнчуков Г. И. Бандажи тягового подвижного состава повышенной эксплуатационной стойкости : дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2007. – 161 с.
2. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения / П. А. Ребиндер, Е. Д. Щукин // Успехи физических наук. – 1972. – Т. 108, № 9. – С. 3-42.

УДК 621.9

ОБРАЗОВАНИЕ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ПРИ УЗВК

В. Ф. Пегашкин, д-р техн. наук, v.f.pegashkin@urfu.ru

Г. А. Осипенкова, канд. техн. наук

НТИ (филиал) УрФУ, г. Нижний Тагил, Россия

Аннотация. Рассмотрен процесс поверхностного пластического деформирования - отделочно-упрочняющей обработки инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой. Определены условия образования полностью регулярного микрорельефа поверхностного слоя детали.

Ключевые слова: пластическая обработка поверхностей, поверхностная деформация, обработка с ультразвуком, отделочно-упрочняющая обработка, регулярный микрорельеф.

Существует большой ряд деталей, долговечность которых напрямую связана с износом рабочих поверхностей. На повышение износостойкости влияют главным образом увеличение микротвердости и сглаженная округлая форма микронеровностей. Благоприятные условия для повышения износостойкости поверхности создаются при поверхностном пластическом деформировании. Поверхностное пластическое деформирование обеспечивает повышение износостойкости, сопротивление усталости, контактной выносливости и других эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей на 20-50 % [1].

Введение в зону обработки ультразвуковых колебаний способствует снижению сопротивления пластическому деформированию и сил трения на контактных поверхностях, что в конечном итоге приводит к значительному снижению статических усилий деформирования [2]. Ультразвуковая обработка обеспечивает получение заданных свойств поверхностного слоя – частично или полностью регулярного микрорельефа, создание остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое обработанных поверхностей [3]. Эффективность ультразвуковой обработки определяется главным образом технологическим методом обработки и ее режимами.

В данной работе рассматривается повышение износостойкости деталей машин на основе разработки метода отделочно-упрочняющей обработки наружных цилиндрических поверхностей с наложением ультразвуковых крутильных колебаний (УЗВК) [4].

Регулярные микрорельефы (РМР) включают в себя полностью регулярные микрорельефы (ПРМР) и частично регулярные микрорельефы (ЧРМР).

Поверхности с ПРМР – поверхности с элементами микрорельефа, форма, расположение и размеры каждого элемента которой обусловлены определенной закономерностью.

Поверхности с ЧРМР – поверхности с элементами микрорельефа, форма, размеры и расположение которых обусловлены определенной закономерностью и между ними имеются участки исходной шероховатости.

Предпочтительным, исходя из эксплуатационных свойств деталей машин, являются ПРМР ПС. Хотя при определенных условиях есть положительные результаты эффективного использования деталей с ЧРМР ПС [5].

Определим условия образования полностью регулярного микрорельефа поверхностного слоя детали.

Первое условие: диаметр деформирующего элемента должен быть больше чем подача и т. д.

$$\frac{s}{2r_s} < 1.$$

Данное условие выполняется всегда, т.к. величина подачи инструмента S , используемая при УЗВК, значительно меньше радиуса индентора r_s .

Второе условие: глубина внедрения деформирующего элемента (h) должна превышать получаемую шероховатость поверхности (Rz)

$$\frac{Rz}{h} < 1.$$

Если это условие не будет соблюдено – на поверхности детали будут оставаться участки исходной шероховатости поверхности.

Введем критерий, характеризующий условия образования регулярного микрорельефа – коэффициент регулярности

$$K_p = \frac{Rz}{h}.$$

При $K_p < 1$ – получаемый микрорельеф поверхности полностью регулярный, при $K_p > 1$ – частично регулярный.

Глубина внедрения

$$h = \left(\frac{0,38 \cdot P \cdot \left(\frac{1-\mu^2}{E} + \frac{1-\mu_1^2}{E_1} \right)}{\sqrt{d}} \right)^{\frac{2}{3}},$$

где E, E_1 – модули упругости обрабатываемого материала и индентора; μ, μ_1 – коэффициенты Пуассона обрабатываемого материала и индентора соответственно

Высота неровностей зависит от коэффициента деформации K_d определяются зависимостями [4]

• для $K_d > 1$

$$Rz = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{S}{2} \right)^2},$$

• для $K_d < 1$

$$Rz = r - \sqrt{r^2 - \frac{\left(S - \frac{Sn}{2N} \right)^2}{4}},$$

где N – частота УЗ колебаний; n – частота вращения заготовки.

Преобразуя, получим

• для $K_d > 1$

$$K_p = \frac{r^{1,67} - r^{0,67} \sqrt{r^2 - \frac{S^2}{4}}}{0,33P^{0,67} \left(\frac{1 - \mu^2}{E} + \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} \right)},$$

• для $K_d < 1$

$$K_p = \frac{r^{1,67} - r^{0,67} \sqrt{r^2 - 0,25 \left(S - \frac{Sn}{2N} \right)^2}}{0,33P^{0,67} \left(\frac{1 - \mu^2}{E} + \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} \right)}.$$

Из полученных выражений определяем величину подачи инструмента для образования полностью регулярного рельефа

• для $K_d > 1$

$$S < 2 \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot h - h^2},$$

• для $K_d < 1$

$$S < \frac{N \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot h - h^2}}{2N - n}.$$

Экспериментальная проверка предложенных критериев показана на профилограммах и фотографиях поверхностей (рис. 1 и 2).

На образце (рис. 1, в) получена поверхность полностью регулярного микрорельефа вогнутой формы в виде кольцевых регулярно расположенных канавок. Полное пересечение регулярных неровностей обеспечивает получение нового микрорельефа (рис. 1, б) с радиусами округлений выступов и впадин большими, чем при точении (рис. 1, а). Коэффициент регулярности $K_p = 0,57$ ($K_p < 1$).

Частично регулярный микрорельеф вогнутой формы с регулярно расположенными неровностями, между которыми имеются участки исходной шероховатости, представлен на рис. 2, в. Особенно хорошо видны участки исходного микрорельефа на профилограмме (рис. 2, б), аналогичные микрорельефу исходного поверхностного слоя (рис. 2), а коэффициент регулярности $K_p = 2,04$ ($K_p > 1$).

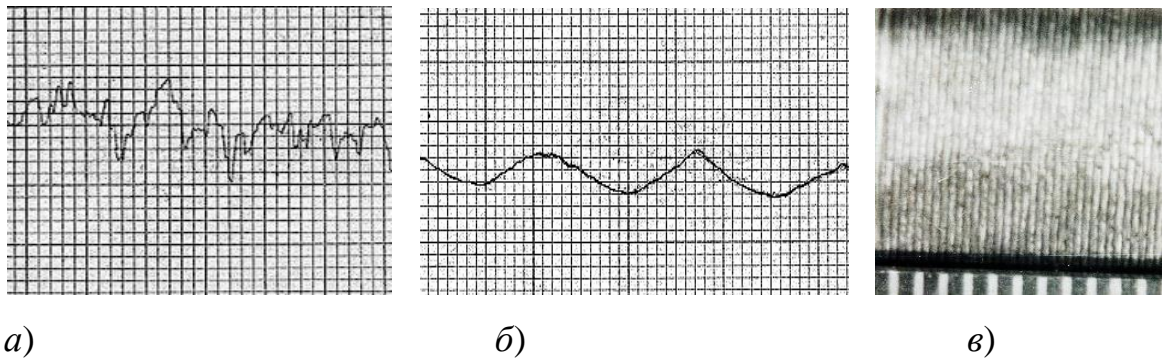


Рис. 1. Полностью регулярный микрорельеф поверхностного слоя:
 а) профилограмма поверхностного слоя до обработки; б) профилограмма
 поверхностного слоя после УЗВК; увеличение по вертикали в 1000,
 по горизонтали в 100 раз;
 в) фотография поверхности; коэффициент регулярности $K_p = 0,57$;
 режимы: $n = 560 \text{ мин}^{-1}$, $S = 0,17 \text{ мм/об}$, $P = 17 \text{ Н}$, $At = 22,5 \text{ мкм}$

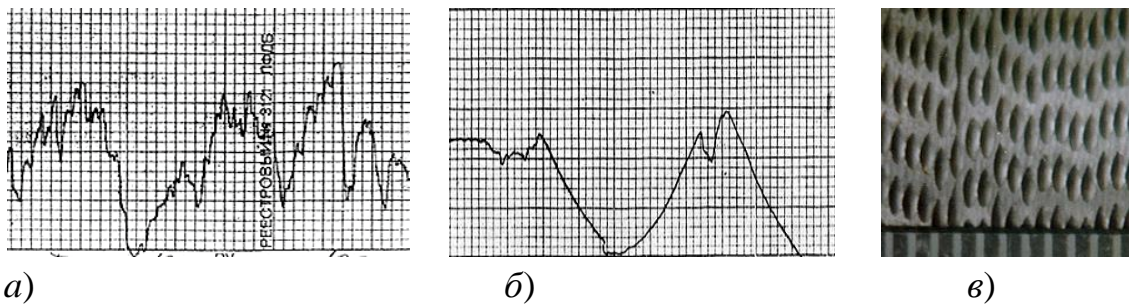


Рис. 2. Частично регулярный микрорельеф поверхностного слоя:
 а) профилограмма ПС до обработки; б) профилограмма ПС после УЗВК; увеличение
 по вертикали в 1000, по горизонтали в 100 раз; в) фотография поверхности; коэффициент
 регулярности $K_p = 2,04$; режимы: $n = 560 \text{ мин}^{-1}$, $S = 0,64 \text{ мм/об}$, $P = 17 \text{ Н}$, $At = 45 \text{ мкм}$

Литература

1. Лещинский В. М. Механические свойства деформированной инструментальной стали / В. М. Лещинский, Л. А. Рябичева // Вестник машиностроения. – № 3. – 1993. – С. 88-94.
2. Киселев Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля / Е. С. Киселев. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – 215 с.
3. Радзевич С. П. Об образовании регулярного микрорельефа при обработке деталей, ограниченных поверхностями сложной формы / С. П. Радзевич // Машиностроение. – № 11. – 1984. – С. 34-41.
4. Пегашкин В. Ф. Определение условий образования регулярного микрорельефа поверхностного слоя детали при УВКК / В. Ф. Пегашкин, Г. А. Осипенкова, Н. Ю. Кукина. – Вестник машиностроения. – № 1. – 2004. – С. 57-59.
5. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1982. – 248 с.

Научное издание

СВАРКА. РЕНОВАЦИЯ. ТРИБОТЕХНИКА

Материалы

IX Уральской научно-практической конференции

Редколлегия:

д-р техн. наук, проф. В. А. Коротков,

д-р техн. наук, проф. В. Ф. Пегашкин,

д-р техн. наук, проф. Е. Н. Сафонов

Верстка *А. В. Кочурина*

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

Информационный сайт НТИ (филиал) УрФУ

<http://nti.urfu.ru>