

Металлургия и материаловедение

УДК 621.762

УПРОЧНЕНИЕ СВАРНОГО ШВА РЕЛЬСОВОГО СТЫКА

С.Е. Алексенцева

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Предложен новый способ упрочнения сварного шва путем взрывного микролегирования. Разработана конструктивная схема упрочнения сварного шва, которая основана на эффекте сверхглубокого проникания энергии взрыва заряда взрывчатого вещества. Использование в схеме накладного заряда обеспечивает метание частиц косой ударной волной под углом порядка 45°. Проведены эксперименты по обработке сварного шва частицами вольфрама стали (0,8 % С); в результате совокупного воздействия ударной волны и внедренных частиц вольфрама твердость повышена в 1,19 раз, микротвердость – на 24–30 %. Метод может быть широко использован для массового упрочнения сварных стыков рельсов железнодорожных путей.

Ключевые слова: *упрочнение сварного шва, заряд взрывчатого вещества, высокоскоростное метание частиц, сверхглубокое проникание частиц.*

Большая протяженность железнодорожных путей в РФ, обусловленная обширными территориями, предполагает качественное бесстыковое соединение, что особенно актуально для вновь вводимых высокоскоростных железнодорожных перегонов. Важность решения проблемы качества сварных стыков проявляется для дальних перегонов – в степях, на Дальнем Востоке и в сибирских районах РФ, т. к. экономически более эффективно изначально сделать качественно стыковые элементы, чем многократно производить ремонтные работы. Для обеспечения бесстыковых рельсовых путей на железнодорожном транспорте применяется в основном сварной метод.

На российских территориях (например, Дальний Восток, Сибирь) в разных природно-климатических зонах со сложными условиями эксплуатации имеет место высокое суточное колебание температуры (десятки градусов) и годовое (более ста градусов) [1]. Это является источником температурных напряжений, которые обуславливают появление дефектов типа микротрещин на начальной стадии разрушения, переходящих в усталостные трещины, что приводит к дальнейшему излому металла с образованием зазоров. Около 50 % особенно ослабленных мест железнодорожных путей составляют зоны сварных соединений [1].

Для железных дорог РФ применяется электроконтактная сварка рельсов с механической обработкой и термическим упрочнением стыков, причем именно термическая обработка обеспечивает прочность сварного соединения, прибли-

Светлана Евгеньевна Алексенцева (к.ф.-м.н., доц.), доцент кафедры «Технология твердых химических веществ».

жающуюся к прочности материала рельсов [2, 3]. Применением термитной сварки достигается прочность сварной зоны только порядка 60 % от прочности материала рельса. Следовательно, актуальным является повышение качества сварного шва и его упрочнение. Цель данной работы – разработка эффективного метода упрочнения сварной зоны рельсового стыка.

В хозяйстве железнодорожного транспорта РФ упрочнение сварных стыков рельсов осуществляется в основном термическим способом, производится термообработка и закалка [2, 3]. Упрочнение производится контактным методом, индукционным нагревом токами средней частоты, закалкой в водовоздушной смеси. Закалка в водовоздушной смеси может способствовать появлению неблагоприятных закалочных структур, поэтому более предпочтительно закачивать сжатым воздухом [2] с определенными температурными режимами [4].

Мировые технологии улучшения эксплуатационных параметров материалов после сварки предлагают низкочастотные и высокочастотные вибрационные методы. По данным отчетов компании Ultrasonic Impact Treatment (USA), вибрационная обработка с частотой ~100 Гц повышает усталостную прочность сварного соединения.

Упрочняющая обработка давлением требует выбора эффективных методов. Упрочнение металлов ударной волной (УВ), в том числе ударно-волновым воздействием зарядов взрывчатого вещества (ВВ), известно достаточно давно, в частности для упрочнения рельса в районе сварного стыка за счет ударно-волнового воздействия накладного заряда ВВ [6]. Схема упрочнения с накладным зарядом должна обеспечивать использование режимов обработки в диапазоне неразрушающих величин давлений [5].

По данным анализа системы дефектности сварных рельсовых швов [2], серийная технология сварки стыков рельсов не обеспечивает постоянного уровня качества, прочностных параметров, точных концентраций элементов (серы, фосфора, алюминия, цветных металлов и др.), возможно появление неметаллических включений, снижающих твердость и прочность.

Основными недостатками в зоне сварных стыков рельсов являются получаемая неравнопрочность между сварным швом и прилегающим к шву материалом целого рельса, возможные ослабления прочностных характеристик материала околошовной зоны и самого сварного шва, возникновение термических трещин.

В настоящей работе предложен новый метод одновременного насыщения зоны сварного шва рельсов дополнительными химическими элементами и нагружения давлением УВ. Предложен метод упрочнения сварного шва рельсового стыка с применением одного из наиболее перспективных способов с использованием взрывных технологий, т. е. обработки сварного шва путем взрывного микролегирования материала стыковой зоны.

Взрывные методы являются наиболее эффективными, обеспечивающими разгон микротел за счет инициирования ВВ со скоростью детонации 5–9 км/с и давлением 10–100 ГПа. Взрывные методы метания компактных тел в режиме сверхглубокого проникания (СГП) с целью обеспечения скоростей метания 1–3 км/с являются наиболее приемлемыми для промышленных технологий. За счет воздействия потоком высокоскоростных порошковых частиц в режиме СГП можно обеспечить повышение прочностных свойств в 1,3–1,5 раз [12, 16]. Остропиковая взрывчатая характеристика ВВ и высокие давления обеспечивают интенсивное воздействие УВ на материал, что является необходимой составной частью комплексного метода взрывного микролегирования [7].

Предлагаемое упрочнение сварного шва за счет обработки потоком высоко-скоростных частиц в режиме сверхглубокого проникания является новым методом динамического нагружения сварного рельсового стыка.

Методика экспериментального исследования

В качестве обрабатываемого материала используется углеродистая сталь У8, близкая по содержанию углерода к сталям М76Т, Э76Ф, К78ХСФ (0,71–0,82 % С), предназначенным для изготовления рельсов [3, 8].

Метание частиц со скоростью 1,5–2,5 км/с реализовано косой УВ при инициировании заряда ВВ. Используются порошковые частицы вольфрама дисперсностью ~10 мкм. Давление соударения частиц с заготовкой имеет расчетное значение 10–13 ГПа, определенное в соответствии с методом согласованных импедансов с построением ударных адиабат материалов частиц и обрабатываемой заготовки [9].

Значения микротвердости обработанного материала получены с использованием микротвердомера ПМТ-3 с нагрузкой на алмазный индентор 100 г [10]. Твердость по системе Виккерса определена на твердомере ТПП-2; нагрузка, приложенная на индентор, составила 10 кг.

Концентрация внедренных частиц вольфрама определена с помощью элементного анализа на рентгеновском микроанализаторе Superprobe JСХА–733, обеспечивающем возможность регистрировать частицы до 0,5 мкм, определять концентрацию элементов с точностью до 0,0001 % по массе [11].

Результаты и обсуждение

Автором разработана принципиальная схема упрочнения сварного шва (рис. 1). В полевых условиях применение сложных взрывных установок для упрочнения сварных швов рельсов нецелесообразно, поэтому автором предложено использовать накладной заряд ВВ (1) (см. рис. 1), на внутреннюю сторону которого нанесен слой метаемых частиц (2). С целью предохранения от разрушения поверхности шва и прилегающей области рельсового стыка на поверхности расположен слой легкого защитного материала (3), по свойствам позволяющий проникание метаемых частиц без значительной потери энергии. При инициировании детонатора (4) осуществляется метание частиц за счет энергии заряда ВВ. Предусмотрен разгонный участок заряда ВВ для выхода процесса детонации в установившийся режим. Ширина накладного заряда превышает ширину стыковой зоны сварного шва, захватывая околошовные области, подвергающиеся нагреву при сварке.

Для простоты реализации данной схемы в качестве заряда ВВ может быть использовано пластичное ВВ с необходимыми взрывчатыми характеристиками. Пластичные ВВ легко принимают любую форму в контакте с поверхностями сложной конфигурации, подлежащей обработке. Это позволяет без дополнительных затрат и просто производить подготовительные действия, собирать элементы схемы, монтировать их на конкретном участке и проводить взрывные работы. Взрывные работы по предполагаемой схеме можно эффективно производить на участках дальних перегонов железнодорожных путей.

Предлагаемое упрочнение сварного шва достигается совместно за счет метания слоя частиц косой УВ и воздействия продуктов детонации. Впервые в данной работе предложен способ упрочнения с применением метания порошковых

частиц в режиме СГП, обеспечивающий объемное микролегирование элементами метаемых частиц.

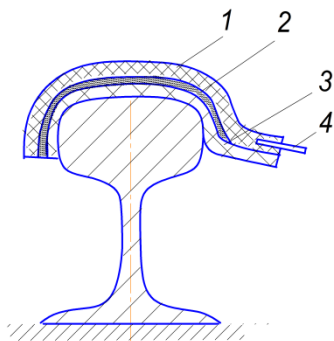


Рис. 1. Принципиальная схема упрочнения сварного шва рельсового стыка:
1 – заряд ВВ; 2 – слой метаемых частиц; 3 – защитный слой материала; 4 – детонатор

Проведены эксперименты по обработке модельного материала стали У8 потоком порошковых частиц вольфрама в режиме сверхглубокого проникания частиц, при котором реализуется внедрение частиц на глубину более ста их характерных размеров в металлические преграды [7, 13], что позволяет упрочнять материал преграды за счет объемного микролегирования элементами внедренных частиц. Технологические режимы обработки находятся в интервале параметров СГП: скорость метания порошковых частиц – 1–3 км/с с характерными размерами частиц от микрометров до сотен мкм, плотность потока частиц – около 1000 кг/м³.

Использование накладного заряда ВВ обеспечивает распространение косоугольной ударной волны под углом около 45°. Метание частиц косоугольной ударной волной под углами, отличными от углов распространения плоской прямой ударной волны (30° и 45°), обеспечивает проникание на глубину несколько меньше (в среднем на 11–15 %), чем метание торцевым способом по нормали [13]. Однако при метании частиц под углом 45° достигается более равномерное распределение микротвердости в сечении заготовки.

Проведено исследование концентрации внедренных частиц вольфрама как среднего значения 4÷6 локальных измерений с разбросом до 3 мм на различных участках заготовки послойно в трех срезах, параллельных поверхности заготовки стали У8, после обработки потоком частиц под углом 45° (рис. 2). Характер концентрационной кривой определяется метанием частиц в виде потока. Немонотонность концентрационной кривой объясняется пространственно-временным характером торможения частиц в преграде, при этом поверхностные слои преграды являются зоной, где энергия частиц максимальна и идет проникание без множественного торможения частиц. В области максимальных значений концентрации имеет место множественное торможение и окончательная остановка частиц. В применении к предложенной автором принципиальной схеме упрочнения сварного шва зона поверхности с низкими значениями концентрации частиц приходится на защитный слой, толщина которого зависит от материала и окончательно не определена.

Глубина внедрения частиц обеспечивает глубину упрочнения шва головки рельса, превышающую вертикальный износ рельса. Так, максимально допускается вертикальный износ головки рельса при соединении двухголовными накладками для всех категорий путей 13 мм (для Р75 и Р65) и 10 мм (для Р50) [3].

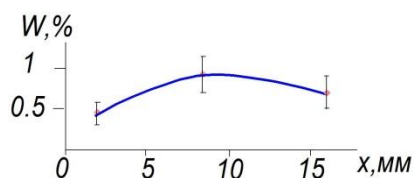


Рис. 2. Изменение концентрации частиц W по высоте заготовки стали У8

Практическое применение данного метода предполагает подбор материала частиц, обеспечивающих повышение прочности и износостойкости обрабатываемого материала. Для повышения износостойкости сталей необходимо наличие карбидов [17]. В принципе, обработка материалов в режиме СГП реализует повышение прочностных свойств и снижение износа при метании различными элементами металлов и прочных соединений, исследованных для разных материалов [12, 14]. Наиболее эффективно повышают эксплуатационные свойства изделий при ударной циклической нагрузке обработкой порошковыми частицами карбидов, нитридов и карбонитридов титана и других высокопрочных, твердых и термостойких элементов.

Повышение износостойкости инструментальных сталей, как например Р6М5, обработанных потоком высокоскоростных частиц, подтверждается в работах [12, 15]. На стадии отпуска обработанной стали появляются зоны с измененной структурой, содержащей элементы порошка метаемых частиц, введенных в процессе динамического микролегирования. Наличие таких зон и приводит к повышению прочности на изгиб и износостойкости.

Коррозионная стойкость может быть повышена за счет введения в рабочую порошковую смесь хрома, т. к. коррозионные разрушения могут распространяться по границам зерен, обедненных хромом [17]. Наличие крупных карбидов является фактором, сдерживающим межкристаллитную коррозию.

При обработке железа и сталей в режиме СГП изменяются микроструктура и тонкая структура материалов. Имеет место формирование диссипативных структур, измельчение зерна [13]. Данные процессы структурообразования благоприятно нивелируют возможное укрупнение структурных элементов при сварке сталей [17].

Основной особенностью обработки материалов потоком высокоскоростных порошковых частиц в режиме сверхглубокого проникания является формирование треков, или канальных структур, в результате проникания частиц. Канальные образования схлопываются после внедрения частиц.

Если производится последующее термическое воздействие на материал, обработанный потоком порошковых частиц, то происходит заваривание канальных образований. При высокоскоростном нагреве под закалку стали Р6М5, легированной никелем и карбонитридом титана, происходит зарастание каналов; при этом их плотность по сравнению с исходным состоянием уменьшается в 2–3 раза [15].

Канальные образования имеют характерную структуру [12]. В центральной канальной области формируются продольные волокна, армированные материалом проникающих частиц. В конце канала регистрируется остаток частицы. Вторым за центральным следует слой разупорядоченной структуры с наноразмерными характеристиками, который формируется при движении частиц в материале; близлежащие канальные зоны представляют собой наиболее деформированные области. В данных областях материала, непосредственно прилегающих

к каналу, не содержатся дефекты деформации типа дислокаций и микродвойников, дефекты упаковки.

Далее следует фрагментированная структура, сильно искаженная вследствие интенсивной пластической деформации. Пластическая деформация вблизи частиц и траекторий их движения реализуется в виде волн, имеющих сдвиговые и ротационные компоненты и протекающих с высокой скоростью. Канальные образования являются упрочняющим фактором, который может обеспечить высокие эксплуатационные характеристики обработанного изделия.

В результате изменения микроструктуры обеспечено повышение прочностных характеристик при обработке стали У8 частицами W, разогнанными в косой УВ под углом 45° (рис. 3).

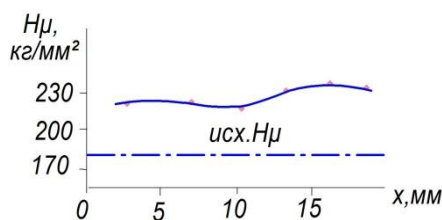


Рис. 3. Изменение микротвердости по высоте заготовки стали У8 после обработки потоком частиц W

Твердость является наиболее близким эквивалентом в оценке прочностных свойств материала. Для заготовки У8 твердость в области максимума концентрации вольфрама на глубине ~ 8 мм составила 340-345 HV, что в 1,19 раза выше исходной. Результаты интегрального повышения твердости и микротвердости позволяют сделать вывод об упрочняющем эффекте в результате предложенного метода обработки.

Для снижения краевого эффекта при метании слоя частиц в околошовной зоне предлагается конструктивно задать нанесение метаемого слоя частиц на расчетно определенную область в центральной зоне заряда ВВ необходимой плотности.

В интервале существования СГП определяется тип применяемого ВВ в зависимости от крутизны рабочих характеристик ВВ, величина заряда ВВ, навеска метаемого порошка, г/мм². По серии опытных проб и полученных результатов определяется единичная или многократная обработка одного и того же шва. Кроме накладного заряда метод метания порошковых частиц предполагает применение для тяжело нагруженных путей кумулятивного заряда.

Выводы

1. Разработан метод упрочнения сварного шва рельсового стыка путем взрывного микролегирования материала стыковой зоны в режиме сверхглубокого проникания. Новая конструктивная схема обеспечивает метание порошковых частиц под углом порядка 45° за счет использования накладного заряда ВВ, на который нанесен слой метаемых частиц. Для упрочнения тяжело нагруженных участков возможно применение кумулятивных зарядов ВВ. Конструктивная схема предусматривает применение специального слоя материала для защиты поверхности рельсового стыка.

2. Для стали У8 показано повышение микротвердости на 24–30 % после обработки потоком частиц вольфрама; твердость по системе Виккерса в области максимума внедренных частиц вольфрама повысилась в 1,19 раза.

3. Упрочнение сварного шва рельсового стыка методом взрывного микролегирования, предложенным в данной работе, позволит повысить качество сварных стыков рельсов и может быть массово использовано, особенно в удаленных районах железнодорожных путей и высокоскоростных участков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Альбрехт В.Г., Виногоров Н.П., Зверев Н.Б. и др.* Бесстыковой путь. – М.: Транспорт, 2000. – 408 с.
2. *Николин А.И.* Совершенствование процессов сварки и термической обработки рельсов магистральных железных дорог: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – М., 2004. – 24 с.
3. Распоряжение ОАО «РЖД» от 10.02.12 № 272 «О вводе в действие Инструкции по применению старогодных материалов верхнего строения пути».
4. Патент RU № 2524526МПК8 C21D9/04, C21D9/50, B23K101/26, 27.07.2014. Маёров Г.Р., Юрченко Д.А., Максимов И.С., Ишимова Э.Б. Способ термической обработки сварных стыков.
5. *Бекренев А.Н., Эпштейн Г.Н.* Последеформационные процессы высокоскоростного нагружения. – М.: Металлургия, 1992. – 159 с.
6. Патент RU № 2102501 МПК7 C21D9/04, C21D7/04, 20.01.1998. Авенян В.А., Доронин Г.С., Ключков С.В., Славинский З.М., Трешкина Е.И., Шарадзе О.Х. Устройство упрочнения рельса в районе сварного стыка.
7. *Алексенцева С.Е.* Повышение эффективности обработки материалов потоком высокоскоростных дискретных частиц // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 142-145.
8. Марочник сталей и сплавов / Сост. М.М. Колосов, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский; Под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2001. – 671 с.
9. *Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Чельшев В.П., Шехтер Б.И.* Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
10. *Колмаков А.Г., Терентьев В.Ф., Бакиров М.Б.* Методы измерения твердости. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 150 с.
11. *Эгертон Рэй Ф.* Физические принципы электронной микроскопии. Введение в просвечивающую, растровую и аналитическую электронную микроскопию / Пер. с англ. С.А. Иванова. – М.: Техносфера, 2010. – 300 с.
12. *Ушеренко С.М.* Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов. – Минск: НИИ импульсных процессов, 1998. – 210 с.
13. *Алексенцева С.Е., Кривченко А.Л.* Исследование особенностей обработки металлов и сплавов высокоскоростным потоком дискретных частиц, разогнанных энергией взрыва канальных зарядов и другими динамическими методами // Вестник Самарский государственный технический университет. Сер. Технические науки. – 2013. – № 2 (38). – С. 71-78.
14. *Aleksentseva S.E.* Features of Structural Changes of Samples of Technical Titanium Subjected to Loading by Shock Waves and Flows of Discrete Particles / S.E. Aleksentseva, M.C. Valioujenitch, D.V. Isaev, A.L. Krivchenko // Shock Waves in Condensed Matter: Proc. of Int. Conf. – St. Petersburg, Russia, 8–13 October. – 2000. – p. 176-177.
15. *Зворыкин Л.О., Ушеренко С.М.* Структурные особенности стали 45 после взаимодействия с высокоскоростными потоками порошков бориды ниобия и силицида молибдена // Металлофизика. – 1993. – Т. 15. – № 1. – С. 92-95.
16. *Алексенцева С.Е.* Дисперсноупрочненные материалы для биомедицины, полученные обработкой высокоскоростным потоком дискретных частиц, разогнанных энергией взрыва // Образование. Наука. Научные кадры. – 2015. – № 2. – С. 250-253.
17. *Гуляев А.П., Гуляев А.А.* Металловедение. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2012. – 643 с.

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2015 г.

REINFORCEMENT OF THE WELD SEAM OF THE RAIL JOINT

S.E. Aleksentseva

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Creation of a new method of a reinforcement of a weld seam by an explosive doping at the expense of a high-speed penetration of particles. Definition of suitability of a method for a reinforcement of welded joints of rails. Creation of a method for raise of operation factors of rail welded joints.

Use of an expedient of a reinforcement of a weld seam by means of effect of superdeep penetration the particles, implemented at the expense of a high-speed throwing of the discrete particles, accelerated by energy of explosion of an explosive charge.

In the offered expedient for a throwing of particles the explosive charge is used superimposed. On an explosive charge bottom face the stratum of particles is superimposed. The explosive charge is disposed on an outside surface of a welded joint. On a rail joint surface the stratum of an easy material for fracture preventing is had. Experiments of a throwing of particles of wolfram on a steel (0.8 % C) are made. Concentration of the implanted particles of wolfram, hardness and microhardness of a steel is spotted. Usage of an superimposed explosive charge implements a throwing of particles by means of a shock wave at an angle . It provides more uniform concentration of the implanted particles.

The offered method implements a high speed throw and the superdeep penetration of particles from solid materials and chemical combinations in metals. Raise of hardness and microhardness of steel (0.8%C) is attained. The offered method can be used for a mass reinforcement of welded joints of rails of railway tracks.

Keywords: *weld seam reinforcement, explosive charge, high-speed throwing of particles, a superdeep penetration of particles.*

УДК 620.197

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ***Н.Г. Кац¹, С.В. Васильев¹, Д.С. Калинкина², Д.В. Коноваленко¹***¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244² АО «Гипровостокнефть»
Россия, г. Самара, ул. Красноармейская, 93

Рассмотрены вопросы электрохимического исследования стальных металлических поверхностей и магниевых сплавов, используемых в качестве протекторов. Для проведения исследований использовались потенциостаты марок П5827М и IPC-prO. Представлены поляризационные характеристики стальных поверхностей и магниевых протекторных сплавов, используемых для защиты нефтяных резервуаров от коррозионного разрушения. Показано, что стальная пластина, из которой сделано днище резервуара, и магниевый сплав, служащий для защиты днища от коррозионного разрушения, имеют похожие коррозионные характеристики при высоком содержании солей в подтоварных водах.

Ключевые слова: *потенциостат, протекторная защита, стальное днище, магниевый протектор, поляризационные кривые.*

Нефтяные месторождения содержат промысловые воды с различными свойствами, такими как ионно-солевой состав, минерализация, *pH* и щелочность.

Основными составляющими ионного состава подтоварных вод являются K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} и HCO_3^- [1]. В зависимости от соотношения ионов подтоварные воды всех месторождений можно разделить в соответствии с классификацией автора работы [2] на четыре типа:

- сульфатонатриевые;
- гидрокарбонатнатриевые;
- хлормагниевые;
- хлоркальциевые.

В табл. 1 приведено усредненное содержание различных ионов и минерализация вод по всем месторождениям, относящимся к данному производственному объединению [2].

Как видно из таблицы, минерализация подтоварных вод различна, но в целом можно считать, что она находится в пределах от 2,0 до 350 г/л. Поэтому для проведения исследований были приготовлены модельные растворы, содержащие основные соли, растворенные в одном литре дистиллированной воды, состоящие из компонентов $NaCl$, KCl , $CaSO_4$, $NaHCO_3$. Минерализация солей в модельном растворе составляла 5, 30, 80 и 200 г/л.

Николай Григорьевич Кац (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

Сергей Владимирович Васильев, ведущий инженер.

Дарья Сергеевна Калинкина, инженер 1-й категории.

Денис Владимирович Коноваленко, старший преподаватель кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

С помощью данного раствора были проведены потенциостатические исследования по определению поляризационных кривых. В качестве рабочего электрода использовались стальные пластины (Ст. 3) и образцы из магниевых протекторных сплавов типа ПРМ-20 размером 10×10 мм следующего химического состава (табл. 2) [2].

Таблица 1

Среднее значение состава подтоварных вод по различным производственным объединениям добычи нефти*

Объект	Ионный состав воды, моль/л				S, г/л	pH
	Na ⁺ , K ⁺	Ca ²⁺ , Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻	HCO ₃ ⁻		
Азнефть	41,2	2,0	0,9	4,6	2,8	8,0
	36,6	2,8	39,7			
Белоруснефть	2630,5	2782,0	10,8	4,5	337,9	6,7
		506,4	6055,8			
Бугурусланнефть	2808,1	402,6	25,5	3,9	200,6	7,1
		184,3	3470,3			
Бузулукнефть	3443,5	386,8	22,4	2,2	222,4	6,7
		161,4	3733,1			
Главтюменьнефтегаз	289,2	37,1	0,2	14,0	18,1	7,0
	331,0	5,7	322,3			
Каспморнефть	36,4	4,0	5,6	3,2	2,3	7,6
	31,7	1,7	25,1			
Киргизнефть	900,0	101,0	25,5	4,9	38,4	7,8
		59,9	670,2			

* В таблице буквой S обозначена общая минерализация.

Таблица 2

Химический состав магниевого протектора ПРМ-20

Mg	Fe	Ni	Si	Al	Ti	Mn	Zn	Cu
Основа	0,006	0,0024	0,017	5,7	0,001	0,23	2,7	0,0013
Основа	0,008	0,0008	0,008	5,8	0,001	0,17	2,5	0,0017

Поляризационные исследования проводились с использованием потенциостата П5827М и более современного прибора марки IPC-Pro. Принципиальная схема, поясняющая принцип работы потенциостата, показана на рис. 1.

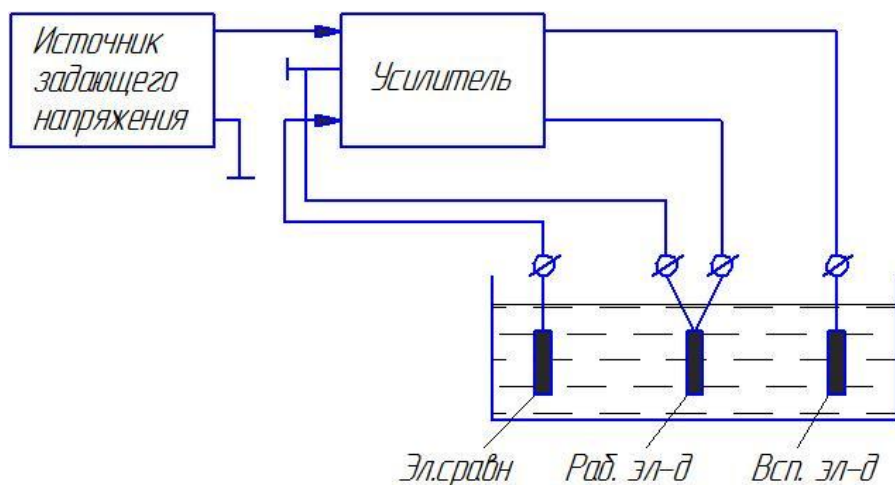


Рис. 1. Принципиальная схема потенциостатирования

На один вход усилителя подается задающее напряжение, а на другой – разность потенциалов между электродом сравнения и рабочим электродом. Входные напряжения в усилителе сравниваются, и полученная разность управляет выходным током усилителя, поляризующим рабочий электрод до потенциала, установленного на источнике заданного напряжения.

Потенциостат состоит из шести функционально связанных блоков, работающих совместно с электрохимической ячейкой и миллиамперметрами.

На рис. 2 и 3 представлены поляризационные кривые для стальных и магниевых сплавов в модельных растворах различной концентрации.

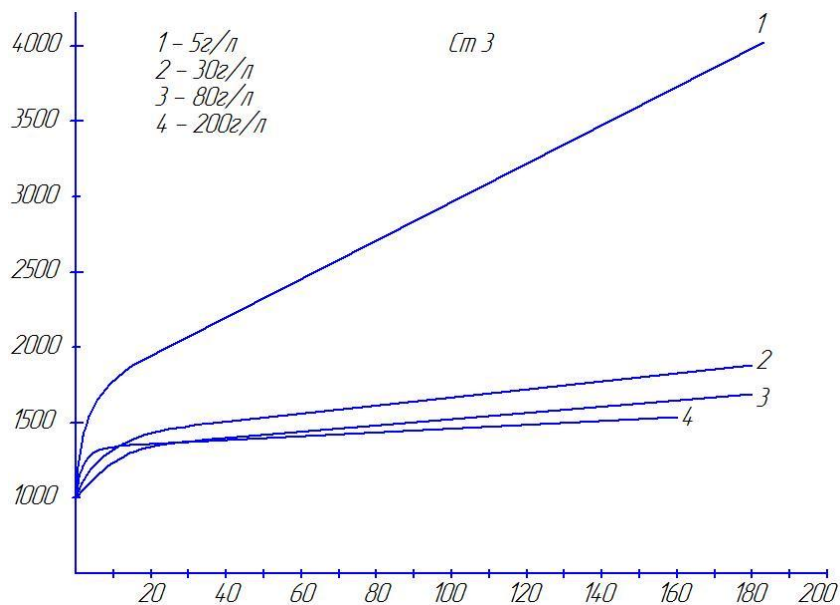


Рис. 2. Поляризационные кривые для стальных образцов (Ст. 3) при концентрации раствора:
1 – 5 г/л; 2 – 30 г/л; 3 – 80 г/л; 4 – 200 г/л

Из представленных данных видно, что с ростом концентрации раствора резко усиливается саморастворение образцов как для стальных, так и для магниевых сплавов, что связано с резким изменением минерализации раствора и возможной поляризацией образцов.

Скорость растворения стальных образцов при концентрации раствора 200 г/л настолько велика, что данный металл применять без защиты невозможно. При этой же концентрации скорость растворения протекторных сплавов как возможной электрохимической пары для защиты металла также велика, и поэтому применять такой сплав для защиты стали от коррозии в качестве протекторов нецелесообразно.

При одной и той же скорости растворения сплавов, например 60 мА, значения потенциалов для стали и протекторных сплавов различаются незначительно. Так, для стали это значение соответствует минус 2450 мВ, а для протекторного сплава – минус 3000 мВ. Это еще раз подтверждает, что скорости растворения этих металлов одинаково велики и при их контакте будет происходить быстрый износ протекторного сплава как анода гальванической пары.

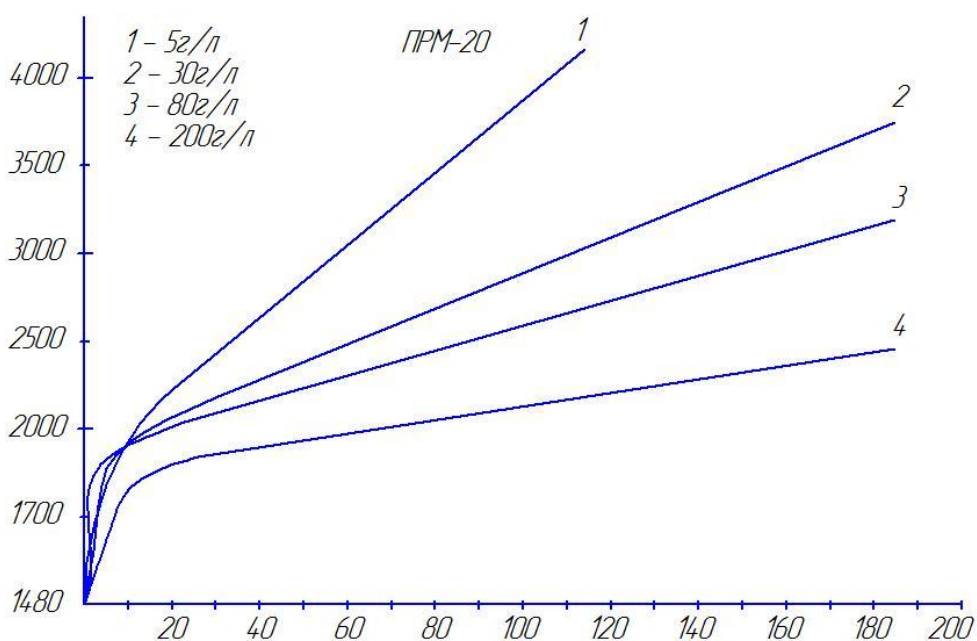


Рис. 3. Поляризационные кривые для магниевых образцов (ПРМ-20) при концентрации раствора:
1 – 5 г/л; 2 – 30 г/л; 3 – 80 г/л; 4 – 200 г/л

Выводы

1. Получены поляризационные кривые, позволяющие судить о скорости растворения металлических материалов.
2. Применение протекторных сплавов для защиты металла от коррозии упрощается, если провести анализ поляризационных кривых.
3. Резкий скачок процесса поляризации металлических образцов приводит к быстрому их саморастворению и снижению эффективности электрохимической защиты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев С.В., Кац Н.Г., Парфенова С.Н., Живаева В.В., Доровских И.В. Общая характеристика и свойства подтоварных вод // ВНИИОЭНГ. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2011. – № 12. – С. 41-42.
2. Сулин В.А. Воды нефтяных месторождений в системе природных вод. – Л.: Химия, 1946. – С. 40-41.
3. Кац Н.Г., Коноваленко Д.В., Васильев С.В. Анализ разрушений магниевых протекторных сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 4(48). – С. 130-134.

Статья поступила в редакцию 20 января 2016 г.

THE POLARIZATION CHARACTERISTICS OF METAL MATERIALS

N.G. Katz¹, S.V. Vasilyev¹, D.S. Kalinkina², D.V. Konovalenko¹

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

² JSC «Giprovostokneft»
93, Krasnoarmeyskaya st., Samara, Russian Federation

The problems of the electrochemical study of metal surfaces of steel and magnesium alloys, used as protectors. For research used potentiostats P5827M brand and IPC-prO. It presents the polarization characteristics of the steel surfaces and magnesium sacrificial alloys used to protect oil tanks from corrosion damage. It is shown that a steel plate, which is made from the bottom of the tank and the magnesium alloy serving for protection from corrosion damage bottoms have similar corrosion characteristics at high salt content in the produced waters.

Keywords: *potentiostat, sacrificial protection, steel and magnesium bottom tread polarization curves.*

*Nikolay G. Katz (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Sergey V. Vasilyev, Leading Engineer.
Darya S. Kalinkina, Engineer.
Denis V. Konovalenko, Senior Lecture.*

УДК 620.1+669-1

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БУРИЛЬНЫХ ТРУБ МЕТОДОМ НАПЛАВКИ

Д.А. Михеев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Статья посвящена оптимизации технологии ремонта бурильных труб методом наплавки. Произведен обзор методов восстановления замковых соединений. Проанализированы различные защитные среды при производстве наплавки, произведен подбор режима предварительного подогрева, а также оптимальной толщины наплавочного слоя. Произведена оценка физико-механических свойств восстановленных замковых соединений бурильных труб, проанализировано микроструктурное состояние основного металла, установлена зависимость размера зерна от толщины наплавляемых слоев. Выполнение мероприятий, разработанных по результатам настоящего исследования, позволит гарантировать высокое качество изделия после ремонта.

Ключевые слова: замковое соединение, бурильная труба, наплавка, флюс, защитная атмосфера, предварительный нагрев.

Оценивая статистические данные, можно сделать вывод, что более 60 % труб отбраковываются по причине износа замкового соединения по наружному диаметру вследствие абразивного износа в процессе эксплуатации. В связи с высокой стоимостью бурильных труб, а также тем, что зачастую отбраковка по наружному диаметру замка вовсе не означает непригодности к работе непосредственно бурильной трубы, потери крупных компаний от отбраковки достигают десятков миллионов рублей. Таким образом, одним из приоритетных направлений при капитальном ремонте бурильных труб стало восстановление геометрических параметров замковых соединений. В настоящее время общепризнано, что наплавка замковых соединений бурильных труб является одним из наиболее эффективных методов восстановления [1]. Данный метод возник в начале XX в., однако широкое применение в данном ключе нашел в 80–90-х гг., когда особенно острой стала проблема нехватки бурильного инструмента. Для ремонта инструмента методом наплавки разработана и используется большая группа наплавочных материалов. По действующим в настоящее время ГОСТам в нее входят 30 типов электродов для ручной дуговой наплавки, 23 марки проволоки для механизированной наплавки и 4 типа порошков для порошковой наплавки и напыления [2-5].

С каждым годом расширяется номенклатура методов и способов восстановления поврежденных деталей. В зависимости от размеров изделия, материала, специфики работы, необходимости создания специальных условий и др. факторов существует несколько основных направлений ремонта наплавкой.

Успешно применяется плазменная наплавка с использованием токоведущей проволоки для создания биметаллических изделий с основой из чугуна, углеродистых, низколегированных сталей [6]. Плазменная наплавка токоведущей про-

волокой возможна как на прямой, так и на обратной полярности. В настоящее время получает распространение наплавка постоянным током на обратной полярности, особенно для металлов и сплавов, в состав которых входят элементы, образующие в процессе наплавки тугоплавкие оксиды. Это в первую очередь алюминиевые сплавы, алюминиевые бронзы, латуни и др. За счет эффекта катодной очистки в процессе наплавки происходит разрушение оксидных пленок на поверхности основного и наплавочного металлов, что улучшает смачиваемость наплавляемой поверхности жидким наплавочным металлом и, как следствие, обеспечивает получение слоев высокого качества. Плазменная наплавка обладает такими важными преимуществами, как высокая производительность, широкая возможность легирования слоев наплавки, большой диапазон регулирования ввода теплоты в основной и наплавочный металлы, возможность применения любых наплавочных металлов. В зарубежной практике плазменную наплавку широко применяют при упрочнении седел клапанов химического оборудования, внутренних поверхностей ротационных насосов из стального литья, клапанов автотракторных двигателей, изнашивающихся поверхностей деталей атомного реактора, барабанов бумагоделательных машин, режущих кромок шнекобурильных машин, долот для вращательного бурения, зубьев экскаваторов. При восстановлении изношенных деталей плазменную наплавку применяют для деталей типа «вал». Недостатком является дороговизна производства.

Одним из новых направлений ремонта является наплавка трением [7]. Данный метод обладает значительным потенциалом для дальнейшего промышленного применения и разрабатывается в качестве практической альтернативы всем остальным методам, однако пока не получил распространения. Технология наплавки трением напоминает обычную сварку трением, проводимую при вращении одного прутка или заготовки относительно другой при непрерывном их поджатии друг к другу. При этом наплавленный слой в зависимости от режима процесса может иметь весьма малую толщину (0,2...0,5 мм). Для сварки не требуется источника питания, сварочных электродов, флюса, газов. Не выделяются вредные аэрозоли, которые сопутствуют производственным процессам. Этим видом наплавки можно наплавлять разнородные металлы, такие как алюминиевые сплавы, алюминий с медью, магний с медью, медь и ее сплавы, медь с никелем, медь со сталью и другие, а также такие металлы, которые электро- или газосваркой сваривать невозможно. Данный метод не подходит для восстановления замковых соединений бурильных труб, так как не обеспечивает необходимой производительности вследствие малой толщины одновременно наплавляемого слоя.

Электронно-лучевая наплавка [8] широко применяется во многих областях из-за высокой глубины и ширины одновременно наплавляемых поверхностей. Достоинством такой технологии является возможность отдельно распределять мощность луча, идущего на подогрев наплавляемой поверхности и наплавляемого металла. Отсюда – возможность добиваться практически минимального перемешивания основного и наплавочного материалов и только в слоях наплавки, прилегающих к основному материалу. Так как наплавка проводится в вакуумных камерах, то выгорание из присадочного материала легирующих элементов исключается; в результате появляется возможность легировать наплавляемый металл в любых количествах и сочетаниях. Присадкой служит проволока сплошного сечения или порошковая. Производительность такой технологии наплавки достаточно велика – до 2 кг/ч, толщина наплавки может быть в пределах 0,2...3 мм.

Данный метод не подходит для восстановления замковых соединений бурильных труб по причине массивности бурильных труб (для наплавки необходима вакуумная камера), а также дороговизны оборудования.

Также нашла применение технология лазерной наплавки [9]. Она осуществляется тремя способами: с подачей присадочного порошка в зону лазерного луча с помощью достаточно сложного дозирующего устройства; с оплавлением предварительно нанесенного на поверхность присадочного материала в виде пасты; с оплавлением предварительно напыленных поверхностей. Быстрое охлаждение наплавленного металла способствует получению высокотвердых структур в наплавке и поверхности основного металла. Способ весьма эффективен, хотя и требует специального дорогого оборудования и обученного персонала. Его используют для наплавки лопастей турбин, клапанов, распределительных валов и других деталей ответственного назначения. Он позволяет получать наплавленные поверхности толщиной до 0,1 мм. Производительность при хорошо организованном серийном производстве может достигать 1 кг/ч при доле основного металла в наплавленном 5...7 % за счет возможности перераспределения тепловложения. Данный метод достаточно дорогостоящий. Кроме того, он требует специфического оборудования и материалов, что делает его малопривлекательным для восстановления замков бурильных труб.

Таким образом, для замковых соединений бурильных труб наиболее подходящим является классический метод восстановления электродуговой сваркой под флюсом, который нашел широкое применение в России. Данный метод достаточно доступный и дешевый, при этом он обеспечивает требуемый уровень качества. Несмотря на то, что методика восстановления замковых соединений бурильных труб используется уже достаточно длительное время, остаются нерешенными ряд технологических проблем.

В соответствии с технологией производства наплавки замков бурильных труб используется флюс 48 ОФ-10, однако существует проблема с удалением данного флюса. Несвоевременное удаление флюса ведет к повышению температуры в зоне сварки и, как следствие, к микроструктурным изменениям, росту зерна и производственному браку. Потери от отбраковки в этом случае могут составлять до 1/3 всех ремонтных труб [10]. При использовании керамического флюса ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) проблемы с удалением отработанного материала отсутствуют, но появляются сложности с дальнейшей механической обработкой – замки бурильных труб после ремонта под керамическим флюсом обладают высокой твердостью, что значительно снижает ресурс обрабатывающего инструмента. Также имеются факты сломов данных замков бурильных труб на забое, что является результатом повышенной хрупкости после ремонта. Ремонт замков бурильных труб в атмосфере защитных газов ранее не производился, и каких-либо сведений по эксплуатационной надежности таких замков не имеется. Поэтому весьма актуальным на сегодняшний день является подбор защитной среды, обеспечивающей оптимально возможный для данных условий комплекс физико-механических свойств.

Говоря о возможных путях совершенствования технологии, следует учитывать ряд важных факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики ремонтного изделия. В первую очередь это наплавленный металл. В наплавленном слое недопустимы поры, трещины и иные пороки, и требования в этом отношении строже, чем предъявляемые к сварным швам [11]. Оптимальный состав наплавленного металла для различных условий службы должен быть выбран с уче-

том всех особенностей его эксплуатации, а электродная проволока, флюс, термический режим наплавки – так, чтобы наплавленный металл обладал в результате необходимым химическим составом и физическими свойствами. Важным фактором, обеспечивающим свойства ремонтного изделия после восстановления, является температурный режим наплавки и используемое технологическое оборудование. Правильный выбор установки для нанесения наплавки, а также режима предварительного подогрева позволит свести к минимуму последующую механическую обработку наплавленных изделий, что приведет к снижению стоимости продукта. Одной из серьезных проблем на данный момент является отсутствие мероприятий по обеспечению должного технологического уровня контроля качества нанесения наплавки для предотвращения усталостного разрушения, растрескивания, температурных деформаций вследствие высокой толщины наплавочного слоя. Замки бурильных труб, бывшие в эксплуатации, сохраняют значительные внутренние напряжения. Если к ним добавляются напряжения после наплавки, изделие может сломаться. Это явление называется усталостным разрушением. Такое разрушение может произойти вблизи места наплавки или в слабых местах конструкции детали [12].

Таким образом, наиболее подходящим является метод электродуговой наплавки, однако он требует доработки для устранения перечисленных выше недостатков. Целью настоящей работы являлась оптимизация технологического процесса восстановления замковых соединений бурильных труб наплавкой.

Объектами исследования являются восстановленные методом наплавки замковые соединения бурильных труб $\varnothing 127,0$ мм с толщиной стенки 9,2 мм группы прочности Д, изготовленные в соответствии с ГОСТ 27834-95 из стали 40ХМФА. Наплавка производилась в условиях центра по ремонту бурильных труб (ЦРБТ) в соответствии с ТУ 1324-002-96380705-2008 на комплексе АКНЗБТ-2-1200 УХЛ 4.

Химический состав стали определяли методом спектрального анализа на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой РМІ Master в соответствии с ГОСТ 18895-97. Испытания на растяжение проводили на разрывной машине Р10М-авто на цилиндрических образцах (тип 3) с продольным расположением волокна в соответствии с ГОСТ 1497-84. Испытания на ударную вязкость производили на образцах Шарпи (тип 11) с V-образным надрезом на маятниковом копре МК-30 в соответствии с ГОСТ 9454-78. Анализ микроструктуры металла выполняли с использованием оптического микроскопа Leitz ММ6 (Германия) на микрошлифах с поперечным расположением волокна. Фотосъемку микроструктуры выполняли на микрорентгеноспектральном анализаторе Jeol Superprobe 733 (Япония). Анализ загрязненности стали неметаллическими включениями проводили на нетравленных микрошлифах с продольным расположением волокна на оптическом микроскопе Leitz ММ6 в соответствии с ГОСТ 1778-80. Размер зерна, а также структурную полосчатость оценивали методом сравнения с эталонными шкалами с использованием оптического микроскопа Leitz ММ6 в соответствии с ГОСТ 5639-82 и ГОСТ 5640-82.

Ремонт производился в различных защитных средах наплавочной проволокой Нп-30ХГСА: в среде CO_2 (образец УГ), в среде смеси защитных газов в соотношении 80 % Ar и 20 % CO_2 (образец УГА), под слоем смеси флюсов ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б), 48 ОФ-10 [13] в соотношении 1:1 (образец КБФ), под слоем флюса ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) (образец КФ), а также под слоем флюса 48ОФ-10 (образец БФ). По результатам исследования химического состава, механических свойств,

а также металлографических характеристик было установлено, что ни один из объектов исследования не соответствует в полной мере требованиям ТУ 1324-002-96380705-2008. В значительной степени уровень механических свойств определяется размером зерна, который колеблется в весьма широком диапазоне (3-11 баллов). По совокупности исследованных характеристик наивысшими показателями обладает образец с маркировкой КБФ. Рост зерна металла основы связан с температурным режимом нанесения наплавки. Для дальнейшей оптимизации режима необходимо уменьшение градиента температур, чего можно достичь путем введения предварительного подогрева в технологический процесс нанесения наплавки. Применение предварительного подогрева позволяет увеличить долю вязкой составляющей с большей устойчивостью к образованию трещин, безопасно рассеять диффузионный водород без риска образования трещин, снизить усадочные напряжения шва и прилегающего металла основы, что особенно важно для соединений под высоким напряжением, снизить риск охрупчивания после восстановления вследствие уменьшения температурных полей, вызывающих внутренние напряжения [14].

В сварочных кодексах обычно указывают минимальные значения температуры предварительного подогрева, которые могут оказаться достаточными или недостаточными для предотвращения образования трещин в каждом конкретном случае. Для изготовления стыковых соединений температуру предварительного подогрева рекомендуется поднять выше минимального уровня, требуемого институтом AISC, а именно 175 °С (AISC LRFD J2.8) [16]. Температура предварительного подогрева более точно рассчитывается по углеродному эквиваленту. В данном случае это углеродный эквивалент стали наплавочной проволоки 30ХГСА. В соответствии со справочником Lincoln Electric [18] углеродному эквиваленту в нашем случае соответствует температура предварительного подогрева 250 °С. Кроме того, отечественные РД дают рекомендации по предварительной прокалке флюса перед работой при 350 °С [17].

Для исследования влияния температуры предварительного подогрева на структуру и свойства наплавки были отобраны 6 образцов замковых соединений бурильных труб. Исследованию подлежали образцы муфт (М) и ниппелей (Н) бурильных труб после восстановления без применения предварительного подогрева (образцы Мк, Нк), а также с предварительным подогревом до 250 °С газовой горелкой (образцы ПП 250 М_р, Н_р) и индуктором (образцы ПП 250 М_и, Н_и). По результатам исследований [14] было установлено положительное влияние предварительного подогрева на свойства всех исследуемых образцов. На образцах ПП 250 М_р и ПП 250 Н_р применялся способ локального нагрева (участка) поверхностей ниппеля и муфты с поворотом трубы и передвижением нагревающего пламени горелки по длине образующей диаметра замков, то есть часть металла нагревалась и одновременно остывала площадь уже нагретого металла, в то время как для нагрева образцов ПП 250 М_и и ПП 250 Н_и применялся индуктор. Данное решение позволило довести до уровня ТУ значения механических свойств ниппельной части замка. Более низкие значения механических свойств для муфтовой части замка после восстановления связаны, по всей видимости, с меньшей толщиной основного металла по сравнению с ниппельной частью замка. Скорость прогрева муфты выше, что диктует необходимость подбора для нее отдельного температурно-временного режима нагрева. Следует понимать, что данное мероприятие значительно снизит производительность ремонта в связи с необходимостью переналадки оборудования под конкретное изделие.

Для того чтобы нивелировать влияние толщины основного металла на результат восстановления бурильного замка, необходимо ограничение толщины одновременно наплавляемого слоя до значения, позволяющего максимально производительно и в то же время без риска перегрева производить его восстановление. Для определения количества нанесенных в ходе восстановления слоев и их толщины, а также металлографических параметров были изготовлены микрошлифы. Исследованию подлежали образцы муфт (М) и ниппелей (Н) бурильных труб после восстановления тремя способами – толщина слоя 12 мм (маркировка Н12, М12), толщина слоя 6 мм (маркировка Н6, М6) и толщина слоя 3 мм (маркировка Н3, М3). Оптимальные значения механических свойств были получены при снижении толщины наплавляемого слоя до 3 мм [15]. Микроструктура мелкозернистая (8–9 баллов), состоит из феррито-перлита. Следов перегрева не выявлено.

Выводы

1. Полученные в ходе работы результаты позволяют утверждать, что в условиях ЦРБТ на комплексе АКНЗБТ-2-1200 УХЛ 4 в соответствии с ТУ 1324-002-96380705-2008 оптимальным является режим ремонта методом наплавки проволокой Нп-30ХГСА замковых соединений бурильных труб Ø 127,0 мм с толщиной стенки 9,2 мм группы прочности Д, изготовленных в соответствии с ГОСТ 27834-95 из стали 40ХМФА под слоем смеси флюсов ЭЛЗ-ФКН-1/55(Б) и 48 ОФ-10 в соотношении 1:1.

2. Доказана необходимость проведения предварительного подогрева ремонтного изделия в индукторе до температуры 250 °С, а также предварительной проковки флюса до 350 °С.

3. Толщина одновременно наплавляемого слоя не должна превышать 3 мм. Соблюдение режима позволит гарантировать качество ремонтного изделия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глазов В.А. Восстановительная наплавка замков бурильных труб // Engineer & technological service SPF–CSC. – 2013. – № 4. – URL: <http://burneft.ru/archive/issues/2013-04/16> (Дата обращения: 25.03.2014).
2. Ворновицкий И.Н. Электроды с железным порошком в покрытии. – М.: РНТСО, 2000. – С. 78.
3. ГОСТ 10051-75. Электроды покрытые металлические для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Типы.
4. ГОСТ 10543-82. Проволока стальная наплавочная. Технические условия.
5. ГОСТ 21448-75. Порошки из сплавов для наплавки. Технические условия.
6. Ен Сян, Дэпин Ю. Влияние термической плазменной струи теплового потока на характеристики поверхностного упрочнения // Теоретические основы химической технологии. – 2015. – № 12 (226). – С. 238-246.
7. Гандра Д. Сварка трением – обзор // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – № 5 (214). – С. 1062-1093.
8. Лацки П., Адамус К., Вечорек П. Теоретические и экспериментальные исследования термомеханических явлений в процессе электронно-лучевой сварки // Вычислительное материаловедение. – 2014. – № 11 (94). – С. 17-26.
9. Кеннеди Э., Бирн Д., Коллинз Д.Н. Обзор использования диодных лазеров высокой мощности при поверхностной закалке // Теоретические основы химической технологии. – 2004. – № 11 (155). – С. 1855-1860.
10. Официальный сайт ОАО «Татнефть» [Электронный ресурс]. – М., 2006-2014. – URL: <http://www.tatneft.ru> (Дата обращения: 25.03.2014).
11. Шоев А.Н. Научно-технические технологии нанесения покрытий // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 11.

12. Сварка и родственные процессы в промышленности: тез. докл. науч.-техн. семинара (17 апр. 2007, Киев, Украина). – К.: Экотехнология, 2007. – 94 с.
13. Амосов А.П., Михеев Д.А. Оптимизация восстановления замковых соединений бурильных труб методом наплавки // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 1.
14. Амосов А.П., Михеев Д.А. Оптимизация режима предварительного подогрева при восстановлении замковых соединений бурильных труб методом наплавки // Экспозиция Нефть Газ. – 2015. – № 4 (43).
15. Амосов А.П., Самсонов М.С., Михеев Д.А. Подбор оптимальной толщины наплавочного слоя при восстановлении замковых соединений бурильных труб // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 12 (54).
16. ANSI/AWS D1.1-96 Structural Welding Code: Steel. The American Welding Society, 1996.
17. РД 39-2-930-83. Типовые технологические инструкции по подготовке к эксплуатации и ремонту бурильных труб в цехах центральных трубных баз производственных объединений Миннефтепрома.
18. Lincoln electric [Электронный ресурс]. URL: <http://www.lincolnelectric.com> (Дата обращения: 05.06.2014).

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2015 г.

REPAIRING DRILL-PIPE TOOL JOINTS BY FACING

D.A. Miheev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper concerns the optimization of the technology for repairing drill pipes by facing. The methods of tool joints repairing are surveyed. Various protective media while performing facing are analyzed. The selection of a preheating mode as well as the optimum thickness of facing layer is made. The physical and mechanical properties of repaired drill-pipe tool joints are assessed, analyzed the microstructure of the base metal is analyzed. The measures devised using the results of this research will guarantee the high quality of repaired products

Keywords: interlocks, drill pipe, resurfacing, flux, protective atmosphere, preheating.

УДК 536.2:621.746.6

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА

Е.А. Якубович

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: ensave@samgtu.ru

Выполнена статистическая оценка точности ранее синтезированных приближенных моделей регрессионного типа, полученных по табличным данным о режимах непрерывного литья деформируемых алюминиевых сплавов в электромагнитный кристаллизатор. В качестве определяемых характеристик процесса использованы глубина жидкометаллической лунки по ликвидусу и солидусу, размер двухфазной зоны в центре слитка. Выполненные расчеты комплекса показателей, включающего коэффициент ранговой корреляции Спирмэна, коэффициент множественной корреляции и коэффициент работоспособности уравнения регрессии, подтверждают пригодность моделей для практического использования. Приведенные расчетные зависимости позволяют осуществить количественный прогноз совместного влияния скорости литья и интенсивности охлаждения на ожидаемые значения глубины лунки и размера двухфазной зоны слитка с выходом на корректировку реальных технологических параметров.

Ключевые слова: *приближенные модели, оценка точности, непрерывный слиток, затвердевание, алюминиевые сплавы*

Совершенствование действующей и разработка перспективных технологий непрерывного литья слитков алюминиевых сплавов, используемых для производства широкой номенклатуры катаных и пресованных полуфабрикатов, требует детального анализа процесса затвердевания с учетом данных экспериментальных исследований и численных расчетов.

Процесс формирования слитка на машинах непрерывного литья характеризуется многофакторностью технологических воздействий, что делает сложным сбор экспериментальных данных и в то же время ограничивает возможности применения детерминированных математических моделей для моделирования и оптимизации процесса. Эффективный путь преодоления указанных трудностей состоит в разработке и применении методов синтеза приближенных моделей регрессионного типа с использованием представленных в табличном виде результатов численных и экспериментальных исследований, дающих исходный статистический материал для анализа процесса путем построения математических моделей.

Такой подход опирается на использование методов структурной и параметрической идентификации регрессионных моделей [1-4], позволяющих установить связь между технологическими параметрами и показателями качества объекта. Появляющиеся здесь особенности применительно к формированию непрерывного слитка позволяют выделить следующие типичные ситуации:

Ефим Абрамович Якубович (к.т.н., доц.), профессор кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы».

- регрессионные модели строятся по экспериментальным данным о влиянии параметров литья на дефекты и другие показатели качества слитка [1];
- синтез осуществляется по результатам численного исследования, целью которого является прогнозирование отдельных показателей качества [2];
- приближенные модели синтезируются по результатам численного исследования температурного поля слитка [3, 4, 5], причем прямые показатели качества слитка не используются.

В работах [4, 5] реализован третий из вышеназванных подходов, позволивший выполнить синтез приближенных регрессионных моделей по результатам численного исследования затвердевания плоских слитков деформируемых сплавов типа Д16 и В95 толщиной 300–600 мм для прогнозирования и анализа наиболее важных выходных переменных – функционалов температурного поля слитка (глубина лунки по температуре, ликвидус и солидус; размер двухфазной зоны в центре слитка) в определенной области изменения внешних управляющих параметров (толщина слитка, скорость литья, интенсивность охлаждения) с учетом некоторых конструктивных и технологических особенностей реальной установки для непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор:

$$h_l = 1,430 \cdot 10^{-4} v b^2 + \frac{143,9 z^*}{b} - \frac{5,794 z^* \sqrt{\alpha^*}}{b^{3/2}}, \quad (1)$$

$$h_s = 1,875 \cdot 10^{-4} v b^2 + \frac{14,32 z^*}{b} + 8,649 \frac{\sqrt{v z^*}}{630 - t^*} + \frac{232,4 z^*}{630 - t^*} + \frac{2,188 \cdot 10^{-4} z^*}{b \alpha^*}, \quad (2)$$

$$\delta = 8,651 \cdot 10^{-5} v b^2 + \frac{1,298 \cdot 10^{20} (z^*)^2}{v^3 b^7 (630 - t^*)} + \frac{2,244 \cdot 10^{-11} v^4 b^6}{z^* \alpha^* (630 - t^*)} + \frac{1559 v (z^*)^2}{\alpha^* (630 - t^*)^2} + \frac{8,464 \cdot 10^9 z^*}{b^2 \alpha^* (630 - t^*)} - \frac{8,864 \cdot 10^{-6} v b (z^*)^2}{630 - t^*}. \quad (3)$$

Входящие в формулы величины означают: h_l , h_s – глубина лунки, соответствующая изотермам ликвидус и солидус; δ – максимальный вертикальный размер двухфазной зоны; $t_n(z^*)$ – температура поверхности в сечении z^* , соответствующем максимальному значению коэффициента теплоотдачи на поверхности слитка α^* ; b – полутолщина слитка; v – скорость литья и имеют следующие размерности: h_l, h_s, δ, z^* – мм; $t_n(z^*)$ – °C; v – мм/мин; α^* – Вт/(м² К).

В работе [6] с использованием моделей получены номограммы, с помощью которых выполнен расчетный анализ тенденций изменения основных режимных параметров формирования слитка в их взаимосвязи, что позволяет в производственных условиях получить оценки рациональных значений скорости литья v и интенсивности охлаждения α^* .

При условии сохранения постоянства скорости литья v можно в выражениях (1)–(3) перейти в качестве выходных переменных $y_j, j = 1, 2, 3$ к следующим функционалам температурного поля слитка:

– время пребывания металла в расплавленном состоянии до момента начала формирования переходной двухфазной зоны

$$\tau_l = h_l / v; \quad (4)$$

– время пребывания расплава в двухфазном состоянии

$$\Delta\tau = \delta / v; \quad (5)$$

– полное время затвердевания слитка

$$\tau_s = h_s / v. \quad (6)$$

Для оценки точности полученных моделей, по которым можно судить о степени совпадения между расчетным значением отклика y_j и значением y_j^* соответствующего уравнения регрессии (4)–(6), использованы следующие показатели:

– максимальное отклонение и сумма квадратов отклонений

$$K_1 = \max_l |y_l - y_l^*|, \quad K_2 = \sum_{l=1}^n (y_l - y_l^*)^2, \quad (7)$$

где $l = 1, 2, \dots, n$ – объем данных, использованных для синтеза;

– максимальное относительное отклонение и сумма квадратов относительных отклонений

$$K_3 = \max_l \left| 1 - \frac{y_l^*}{y_l} \right|, \quad K_4 = \sum_{l=1}^n \left(1 - \frac{y_l^*}{y_l} \right)^2; \quad (8)$$

– коэффициент ранговой корреляции Спирмэна [7]

$$K_5 = 1 - \frac{6 \sum_{l=1}^n (A_l - B_l)^2}{n^3 - n}, \quad (9)$$

где A_l, B_l – ранги (порядковые номера) величин y_l и y_l^* , упорядоченные каждая отдельно по возрастанию;

– коэффициент множественной корреляции

$$K_6 = \sqrt{1 - \frac{K_2}{Q}}, \quad (10)$$

где Q – сумма квадратов отклонений выходной переменной,

$$Q = \sum_{l=1}^n (y_l - \bar{y})^2, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n y_l;$$

– коэффициент работоспособности уравнения регрессии [8]

$$K_7 = \frac{s}{s_{ост}}, \quad (11)$$

$$\text{где } s = \sqrt{\frac{Q}{(n-1)}}, \quad s_{ocm} = \sqrt{\frac{K_2}{n-m}};$$

– отношение дисперсий

$$K_8 = K_7^2 = \frac{s^2}{s_{ocm}^2}. \quad (12)$$

Оценка точности приближенных регрессионных моделей

Показатели точности моделей	Объем данных, использованных при синтезе, n	Оцениваемые модели			Значения $K_{кр}$, уровень значимости $p = 0,01$ [7]
		Время до момента начала перехода расплава в двухфазное состояние (4)	Время пребывания расплава в двухфазном состоянии (5)	Полное время затвердевания слитка (6)	
K_1	30	12,7	1,7	14,1	–
	50	15,4	2,0	14,7	–
	55	15,4	2,0	14,7	–
K_2	30	1950	30	2150	–
	50	3010	50	3490	–
	55	3100	54	3570	–
K_3	30	0,046	0,024	0,036	–
	50	0,051	0,027	0,041	–
	55	0,051	0,027	0,041	–
K_4	30	0,021	0,004	0,015	–
	50	0,033	0,009	0,024	–
	55	0,034	0,010	0,025	–
K_5	30	0,874	0,903	0,887	0,478
	50	0,894	0,909	0,899	$\leq 0,40$
	55	0,912	0,844	0,906	$\leq 0,40$
K_6	30	0,870	0,928	0,871	0,463
	50	0,871	0,920	0,864	0,364
	55	0,882	0,899	0,878	$\leq 0,36$
K_7	30	1,88	2,44	1,93	2,0
	50	1,95	2,40	1,92	2,0
	55	2,04	2,20	2,03	2,0
K_8	30	3,55	5,96	3,71	$\leq 2,55$
	50	3,81	5,74	3,70	$\leq 2,10$
	55	4,18	4,85	4,13	$\leq 2,10$

Проверка значимости регрессии осуществляется путем сравнения показателей K_5, K_6 и K_8 с соответствующими теоретическими (критическими) значениями. Регрессия считается значимой при $K > K_{кр}$. [7]. Приемлемая работоспособность уравнения регрессии обеспечивается согласно [8] при значениях $K_7 \geq 2$.

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о весьма близком совпадении между откликами $\tau_l, \Delta\tau, \tau_s$ и значениями $\tau_l^*, \Delta\tau^*, \tau_s^*$, определенными по формулам (4)–(6). Удовлетворительные показатели точности регрессионных моделей получены также для режимов охлаждения, которые в ходе синтеза не использовались. Это подтверждает надежность полученных моделей при условии, что значения входных переменных не выходят за пределы области их задания в настоящей работе. Отметим, что синтез проводился на основе данных, в которых коэффициент теплоотдачи α в верхнем поясе охлаждения электромагнитного кристаллизатора принят постоянным. Проверочные расчеты показывают, что точность моделей практически не изменяется, если коэффициент теплоотдачи колеблется в пределах $\alpha = 5230\text{--}7330 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$, что согласуется с реальной ситуацией в системах охлаждения непрерывных слитков в электромагнитных кристаллизаторах.

Полученные оценки точности приближенных регрессионных моделей формирования непрерывного слитка позволяют сделать вывод о возможности использовать их для содержательного анализа и выбора рациональных режимов охлаждения и определения допустимых пределов скорости вытягивания слитка, а также для достоверной количественной оценки совокупного влияния различных технологических параметров на косвенные показатели качества слитка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дюдкин Д.А., Токарев В.Л., Ильин А.А. и др. Оптимизация режима вторичного охлаждения непрерывного слитка с помощью приближенной модели // Сталь. – 1981. – № 9. – С. 30-32.
2. Клявинь Я.Я., Клявиня И.Я., Позняк А.А. Методика синтеза регрессионных моделей на основе данных о влиянии параметров литья на критерии качества // Изв. АН ЛатвССР. Сер. Физ. и техн. науки. – 1982. – № 1. – С. 65-71.
3. Клявинь Я.Я., Клявиня И.Я., Брока М.Э., Якубович Е.А. Синтез регрессионных моделей по результатам численного исследования температурного поля слитка // Изв. АН ЛатвССР. Сер. Физ. и техн. науки. – 1982. – № 6. – С. 76-84.
4. Якубович Е.А. Приближенные модели регрессионного типа для анализа затвердевания непрерывных слитков алюминиевых сплавов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 222-224.
5. Брока М.Э., Клявинь Я.Я., Шадрин Г.Г., Якубович Е.А. Численное исследование затвердевания плоских слитков из высоколегированных алюминиевых сплавов при непрерывном литье // Цветные металлы. – 1986. – № 4. – С. 75-77.
6. Якубович Е.А. Номограммы для анализа режимов затвердевания слитков в процессе непрерывного литья // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 2 (46). – С. 202-207.
7. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. – М.: Мир, 1980. – 610 с.
8. Бородюк В.П., Лецкий Э.К. Статистическое описание промышленных объектов. – М.: Энергия, 1971. – 111 с.

Статья поступила в редакцию 20 января 2016 г.

ASSESSMENT OF ACCURACY OF THE APPROXIMATE REGRESSION MODELS FOR SOLIDIFICATION OF THE CONTINUOUS INGOTS

E.A. Yakubovich

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper deals with a statistical evaluation of the accuracy of the previously synthesized approximate models of regression type, obtained from tabular data on a continuous casting modes of deformable aluminum alloys in an electromagnetic mold. As determined by the characteristics of the process used liquid metal depth wells liquidus and solidus, the size of a two-phase-band in the center of the ingot. The calculations set of indicators, including Spearman rank correlation coefficient, multiple correlation coefficient and operability coefficient for regression equations confirm the performance models for the practical use. These calculated dependences allow a quantitative forecast of the joint effect of casting speed and cooling intensity to the expected value of the depth of the wells and the size of the two-phase zone of the ingot with access to the adjustment of real technological parameters.

Keywords: *assessment of accuracy, approximate models, continuous ingot, solidification modes, aluminium alloys.*