

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 частиц, реализуемого за счет высокоскоростного метания дискретных частиц энергией взрыва заряда взрывчатого вещества. Использование в схеме накладного заряда обеспечивает метание частиц косо 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 закаливать 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 высокоскоростных 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.

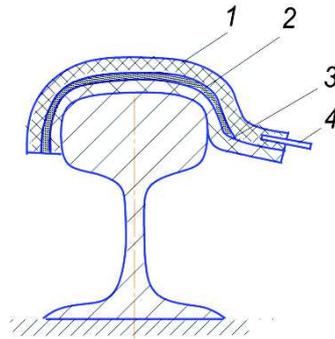


Рис. 1. Принципиальная схема упрочнения сварного шва рельсового стыка:
1 – заряд ВВ; 2 – слой метаемых частиц; 3 – защитный слой материала; 4 – детонатор

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 косой УВ под углом около 45°. Метание частиц косой УВ под углами, отличными от углов распространения плоской прямой УВ (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].

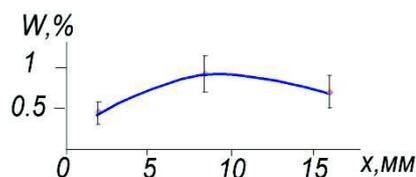


Рис. 2. Изменение концентрации частиц W по высоте заготовки стали У8

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 микровдвойников, 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).

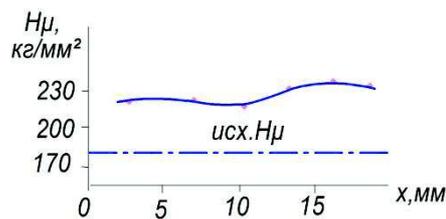


Рис. 3. Изменение микротвердости по высоте заготовки стали У8 после обработки потоком частиц W

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 околосшовной 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, $г/мм^2$. 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., Клочков 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.*