

На правах рукописи

ГАЛАЙ МАРИНА СЕРГЕЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ
БЕССТЫКОВОГО РЕЛЬСОВОГО ПУТИ**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», г. Новосибирск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Каргин Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ситников Александр Андреевич
кандидат технических наук, доцент
Коноводов Виталий Васильевич

Ведущая организация: **ГОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения»**

Защита состоится « 9 » ноября 2011 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.07 при ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр., К. Маркса, 20

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат диссертации разослан « ___ » октября 2011г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

Никитин Ю.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие железных дорог Российской Федерации выдвигает новые требования к верхнему строению пути, в том числе связанные с ликвидацией стыков в пределах стрелочных переводов и звеньевых участков. При создании бесстыкового пути применяют контактный и алюминотермитный способы сварки. В странах Западной Европы и США способ алюминотермитной сварки широко используют на сети железных дорог – им сваривают стыки не только в районе стрелочных переводов, но и на перегонах основного пути. В России АЛТС в большей степени проводится в труднодоступных местах стрелочных переводов, на мостах, в тоннелях и кривых малого радиуса, где выполнение контактной сварки невозможно.

Анализ применения сварных соединений рельсов, полученных алюминотермитной сваркой на Западно-Сибирской железной дороге, показал, что в процессе эксплуатации возникают такие дефекты, как смятие головки рельса и усталостное разрушение подошвы в зоне сварных швов. Это снижает надежность рельсовых соединений и, как следствие, безопасность движения поездов.

Следует отметить, что в литературе недостаточно сведений о причинах возникновения дефектов смятия головки рельса в зоне алюминотермитных сварных соединений. Поэтому для решения проблемы необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на изучение свойств сварных соединений рельсов, выполненных алюминотермитной сваркой, и технологических методов повышения их эксплуатационной стойкости.

К одной из причин выхода рельсов из строя по дефектам усталостного разрушения подошвы рельса в зоне сварных швов можно отнести повреждения поверхности подошвы рельса, возникающие при выполнении операции удаления литников. Литники, расположенные на подошве рельса сварных швов, обрубаются ручным способом. После удаления литников на подошве рельса возможно образование вырывов и трещин, которые, являясь концентраторами напряжений, увеличивают вероятность появления усталостных трещин в подошве рельсов при эксплуатации бесстыкового пути. Для уменьшения таких дефектов в сварных швах требуется совершенствование технологии бесстыковых рельсовых соединений, например, путем механизации операции удаления литников. Однако для механизации этой операции в полевых условиях необходима разработка мобильного оборудования.

Учитывая современные тенденции к увеличению количества бесстыковых рельсовых соединений, работа, посвященная совершенствованию технологии выполнения алюминотермитных сварных соединений рельсов в полевых условиях, является актуальной.

Цель работы заключается в повышении эксплуатационной стойкости алюминотермитных сварных рельсовых соединений бесстыкового пути за счет совершенствования технологии монтажа в полевых условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи.

1. Выявить причину образования дефектов смятия головки рельса в зоне сварных соединений рельсов, полученных алюминотермитной сваркой.

2. Исследовать возможность применения поверхностного пластического деформирования для повышения эксплуатационных свойств сварных швов головки рельсов.

3. Установить функциональные зависимости микротвердости и глубины упрочненного слоя от энергии единичного удара при обработке поверхностным пластическим деформированием алюминотермитных сварных соединений рельсов.

4. Разработать конечно-элементную модель процесса кристаллизации алюминотермитного сварного соединения рельса с применением программного комплекса.

5. Обосновать необходимость совершенствования технологической операции удаления литников в зоне подошвы рельса алюминотермитных сварных соединений.

6. Определить энергоемкость технологической операции удаления литников на основе математического моделирования.

7. Разработать оборудование для выполнения в пути технологических операций упрочнения поверхности катания головки рельса в зоне алюминотермитных сварных соединений и удаления литников, представляющего собой многофункциональную машину ударного действия.

Методы исследований. Представленные в работе результаты получены на основе экспериментальных исследований с использованием апробированных методик, измерительных приборов и оборудования. Моделирование процесса кристаллизации сварного соединения рельса осуществлялось с помощью сертифицированного программного комплекса LVMFlow. Статистическая обработка результатов выполнялась с использованием сертифицированной программы STATISTICA 6.0.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Теоретические и экспериментальные исследования базируются на основных положениях технологии машиностроения, материаловедения, машиноведения и статистической обработки данных.

Научная новизна.

1. Получены функциональные зависимости микротвердости и глубины упрочненного слоя от технологических параметров обработки поверхности катания алюминотермитных сварных соединений рельсов пластическим деформированием.

2. Введен интегральный показатель удельной энергии единичного удара, позволяющий определить режимы обработки поверхностным пластическим деформированием, обеспечивающие получение необходимых параметров твердости и глубины упрочнения сварных соединений рельсов, выполненных алюминотермитной сваркой.

3. Разработана конечно-элементная модель процесса кристаллизации алюминотермитного сварного соединения рельса в программе LVMFlow, позволяющая оценить распределение температурного поля по сечению сварного соединения рельса в процессе его кристаллизации. Впервые изучен характер изменения температуры по сечению алюминотермитного сварного соединения рельса в процессе охлаждения.

Практическая ценность.

1. Разработан технологический процесс механической обработки алюминотермитных сварных соединений рельсов в полевых условиях, включающий в себя операции пластического деформирования поверхности катания головки рельса и удаления литников в горячем состоянии, обеспечивающий повышение эксплуатационной стойкости сварных соединений.

2. Разработана конструкция технологического оборудования, реализующая в полевых условиях операции упрочнения поверхности катания головки рельса и формирования резанием профиля подошвы рельса в зоне сварных соединений.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты экспериментальных исследований влияния ударного пластического деформирования на микротвердость, глубину упрочнения и контактно-усталостную прочность сварных швов головки рельсов;
- результаты исследования процесса формирования резанием профиля подошвы рельса в зоне сварных швов;
- конструкция оборудования для упрочнения поверхности катания головки рельсов и удаления литников в зоне сварных швов;
- новый технологический процесс механической обработки алюминотермитных сварных соединений рельсов.

Личный вклад автора заключается в постановке задач, проведении экспериментальных исследований, в обработке и интерпретации результатов и формулировке выводов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 2009, 2010 г.), научно-технической конференции «Молодежь и научно – технический прогресс» (г. Владивосток, 2009 г.), XIII Международной научно-практической конференции "Современные технологии в машиностроении" (г. Пенза, 2009 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Качество и инновации – основа современных технологий» (г. Новосибирск, 2010), VIII Международной научно-технической конференции "Материалы и технологии XXI века" (г. Пенза, 2010 г.), конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» (г. Новосибирск, 2010), Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2010), научных семинарах кафедры «Технология транспортного машиностроения и эксплуатация машин». Работа диссертанта отмечена в номинации «Технологии, процессы и алгоритмы 2009» конкурса «Стипендия администрации Новосибирской области».

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 10 печатных работах автора, из которых 3 работы опубликовано в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 7 – в сборниках трудов международных и Всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников, включающего 113 наименований, и приложения. Общий объем работы составляет 159 страниц, в том числе 8 таблиц, 97 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Приведен краткий анализ состояния проблемы.

В первой главе рассмотрена существующая технология создания бесстыковых рельсовых соединений алюминотермитным способом сварки, состоящая из подготовительного процесса, процесса сварки и механической обработки сварных соединений. Отмечено, что, несмотря на повышенные требования, предъявляемые к сварным соединениям рельсов при создании бесстыкового пути, практика показывает, что в процессе эксплуатации бесстыкового пути в сварных швах, выполненных алюминотермитной сваркой, появляются такие дефекты как смятие головки рельса и усталостное разрушение подошвы.

Проанализированы возможные способы повышения качества алюминотермитных сварных соединений рельсов в полевых условиях. Обоснована необходимость введения на финишной стадии механической обработки сварных соединений операции поверхностного пластического деформирования (ППД). Анализ исследований, проведенных Л.Г. Одинцовым, Д.Д. Папшевым, Б.П. Рыковским, В.Н. Емельяновым, В.А. Лебедевым и другими авторами, позволил сделать вывод о том, что по сравнению со статическими методами динамические методы ППД обеспечивают наибольшую глубину упрочненного поверхностного слоя, причем упрочненный слой обладает высокой твердостью и большими значениями остаточных напряжений сжатия. Однако большинство динамических методов ППД реализуются с использованием оборудования, обладающего большими массогабаритными параметрами, что затрудняет его применение для обработки сварных швов в полевых условиях. Среди известных динамических методов ППД ударное пластическое деформирование является одним из наиболее простых и эффективных способов упрочнения. По показателям производительности, универсальности, эффективности упрочнения деталей сложной формы и массогабаритным параметрам оборудования ударное пластическое деформирование превосходит большинство других способов. Поэтому представляется целесообразным его использование для повышения эксплуатационной стойкости сварных соединений рельсов.

Сократить появление дефектов усталостного разрушения подошвы рельса в зоне сварных швов возможно путем механизации операции обрубки литников. При существующей технологии механической обработки алюминотермитных сварных швов слой лишнего металла, образовавшийся на поверхности

катания головки рельса, срезается специальными ножами, установленными на штоках гидроцилиндров. Литники, расположенные на подошве рельса в зоне сварного шва, сначала подрубаются в горячем состоянии, а затем отбиваются вручную. Несмотря на то, что обрубка литников является относительно простой операцией, тем не менее, она может существенно влиять на надежность сварного соединения. При удалении литников обрубщик, даже при хорошей надрубке литника, может вырвать часть металла из тела отливки, что в дальнейшем станет причиной усталостного разрушения подошвы рельса в зоне сварного соединения рельса.

В результате проведенного анализа определено основное направление совершенствования технологического процесса механической обработки алюминотермитных сварных соединений рельсов, заключающееся в применении метода поверхностного пластического деформирования в качестве финишной операции механической обработки поверхности катания сварных швов и механизации операции удаления литников.

Во второй главе приведены результаты оценки твердости и исследования структуры алюминотермитных сварных соединений рельсов.

Сварка рельсов алюминотермитным способом осуществлялась в ООО «СНАГА – Сибирь» в соответствии с требованиями ТУ 0921-127-01124323-2005 «Сварка рельсов алюминотермитная методом промежуточного литья».

Для исследования микроструктуры и определения твердости металла сварных соединений рельсов были приготовлены шлифы, вырезанные из головки, шейки и подошвы алюминотермитного сварного соединения рельса, показанного на рис. 1.

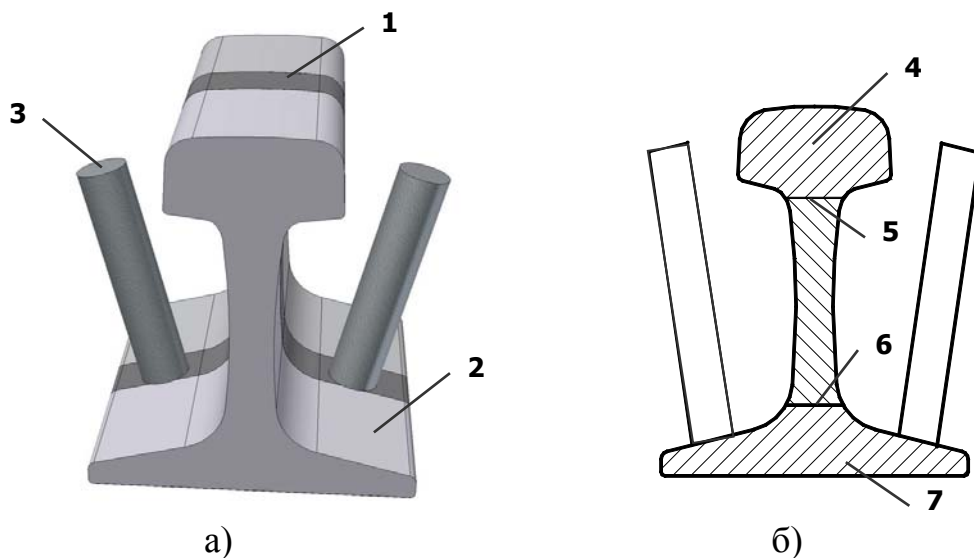


Рис. 1. Алюминотермитное сварное соединение рельса: а) общий вид, б) схема, 1-сварной шов, 2 - рельс, 3 – литник, 4 - головка рельса, 5 - верхняя часть шейки рельса, 6 - нижняя часть шейки рельса, 7 - подошва рельса.

Из анализа значений твердости сварных швов в головке рельса, представленных на рис. 2, следует, что на поверхности катания твердость составляет 220 – 245 НВ.

На границе сплавления литого металла и металла рельса, расположенной на расстоянии 30 – 36 мм от середины сварного шва, происходит увеличение твердости до 280 НВ. В зоне термического влияния твердость достигает 380 НВ, затем происходит снижение твердости до 270 – 280 НВ. Последующее повышение твердости до 340 – 350 НВ свидетельствует о том, что материал близок к твердости термообработанного металла рельса.

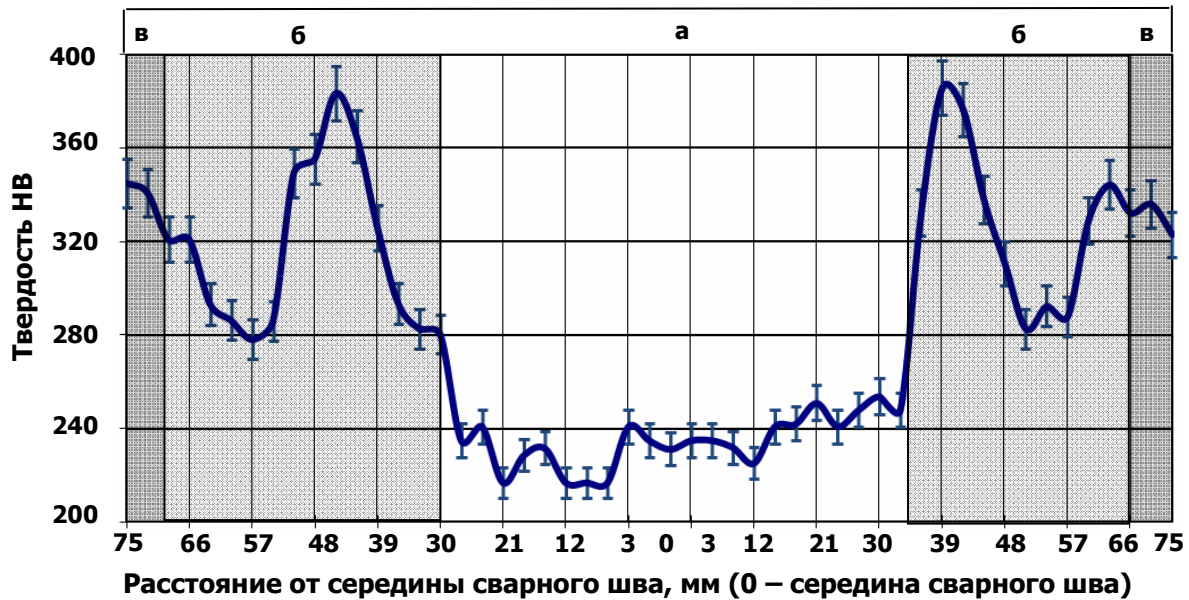
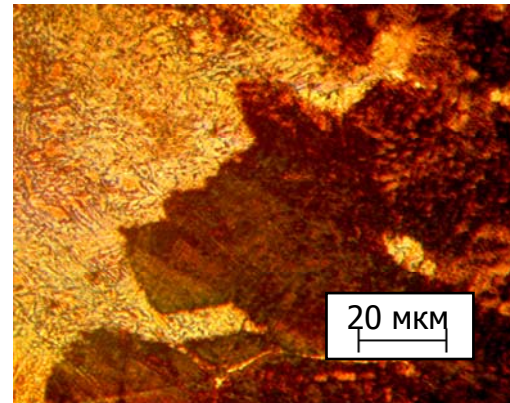
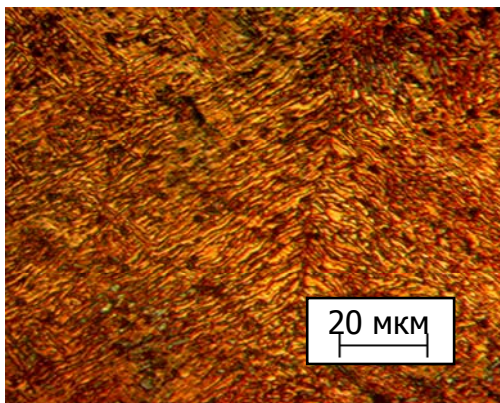


Рис. 2. Распределение твердости сварного шва и зон термического влияния на поверхности катания головки рельса: а) зона сварного шва, б) зона термического влияния, в) основной металл рельса.

Микроструктурный анализ показал, что структура сварных швов головки рельса, приведенная на рис. 3, а, представляет собой структуру литой эвтектидной стали – игольчатый феррит и сорбит с встречающимися дендритными кристаллами. Граница сплавления, как это видно на рис. 3, б, имеет неровную поверхность.



а)

б)

Рис. 3. Структура металла головки рельса: а) сварной шов, б) граница сплавления.

За границей сплавления в зоне термического влияния наблюдаются крупные зерна со структурой троостита, окаймленные ферритными прослойками, это свидетельствует о том, что в данной зоне были крупные зерна аустенита, то есть сталь была перегрета. Этим объясняется повышенная твердость в начале зоны термического влияния. Наличие в зоне термического влияния феррито–цементитной смеси, соответствующей структуре высокого отпуска, подтверждает снижение твердости до 280 НВ.

Твердость сварных швов верхней части шейки рельса составляет 230 – 250 НВ. В зоне термического влияния характер изменения твердости в шейке рельса такой же, как и в сварных швах головки рельса, а структура сварных швов шейки рельса более грубая, чем в головке рельса. Твердость зоны сварных швов нижней части шейки и подошвы рельса составляет 300-320 НВ, что значительно выше значений твердости сварных швов в головке и верхней части шейки рельса.

В результате проведенных исследований установлено, что твердость на поверхности катания алюминотермитных сварных соединений рельсов в ряде случаев не удовлетворяет требуемым показателям действующих технических условий. Согласно ТУ 0921-127-01124323-2005, твердость алюминотермитных сварных соединений на поверхности катания должна быть близка к твердости объемнозакаленных рельсов и достигать величины 380-400 НВ, тогда как в исследуемых образцах она составляет 220-245 НВ, что значительно ниже допустимых значений. Пониженная твердость на поверхности катания сварных швов приводит к неравномерному износу в процессе их эксплуатации и является причиной дефекта смятия головки рельса. Таким образом, полученные результаты оценки твердости и структурных исследований свидетельствуют о необходимости принятия таких технических решений, которые способствовали бы устранению отмеченных недостатков.

В третьем разделе «Влияние поверхностной пластической деформации на свойства поверхности катания головки рельса алюминотермитных сварных соединений» показано, что эффективным решением, способствующим повышению твердости поверхности катания сварных соединений рельсов, является применение ударного пластического деформирования. В разделе представлены результаты исследования влияния ударного пластического деформирования на микротвердость, глубину упрочнения и контактно-усталостную прочность поверхности катания сварных швов.

Для проведения эксперимента по упрочнению поверхности катания головки рельса в зоне сварных швов ударом создан лабораторный копер, выполняющий однократное ударное воздействие с энергией удара T , изменяющейся от 5 до 30 Дж. В целях определения минимальной энергии единичного удара, необходимой для упрочнения и определяющей в дальнейшем массогабаритные параметры инструмента, исследовались инденторы двух типов: со сферическим торцом радиусом 5 мм и с цилиндрическим плоским торцом такого же радиуса. После единичного ударного воздействия на сварной шов с различной энергией удара оценивались: диаметр отпечатка d_{omn} ; глубина отпечатка h_{omn} ;

микротвердость H и глубина упрочненного слоя $h_{упр}$ в зоне приложения нагрузки. Схема измерения отпечатка, при упрочнении индентором с цилиндрическим плоским торцом, приведена на рис. 4.

Анализ результатов измерения глубины отпечатка, микротвердости и глубины упрочнения поверхностного слоя при различных энергиях удара индентором со сферическим торцом показал, что микротвердость, по сравнению с исходным значением микротвердости, составляющим 2300 - 2500 МПа, при увеличении энергии удара от 5 до 30 Дж изменяется от 4100 МПа до 10000 МПа. Глубина упрочнения составляет 2,8 мм при максимальном значении энергии удара 30 Дж, при этом глубина отпечатка достигает 120 мкм, что вызывает необходимость шлифования поверхности катания головки рельса в зоне сварных швов.

При обработке индентором с плоским торцом глубина отпечатка значительно меньше, чем при упрочнении индентором со сферическим торцом, и составляет 32 мкм при энергии удара 30 Дж (рис. 5, а). Микротвердость увеличивается от 3500 до 9000 МПа при изменении энергии удара от 5 до 30 Дж, а глубина упрочнения варьируется от 0,6 мм до 2,4 мм (рис. 5,б).

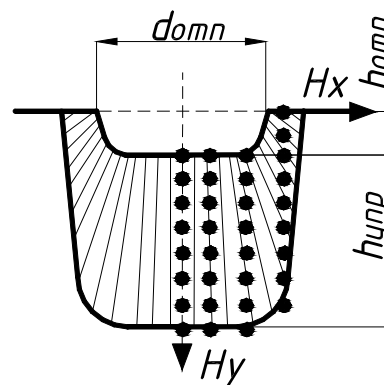


Рис. 4. Схема измерения отпечатка после воздействия индентора с плоским торцом.

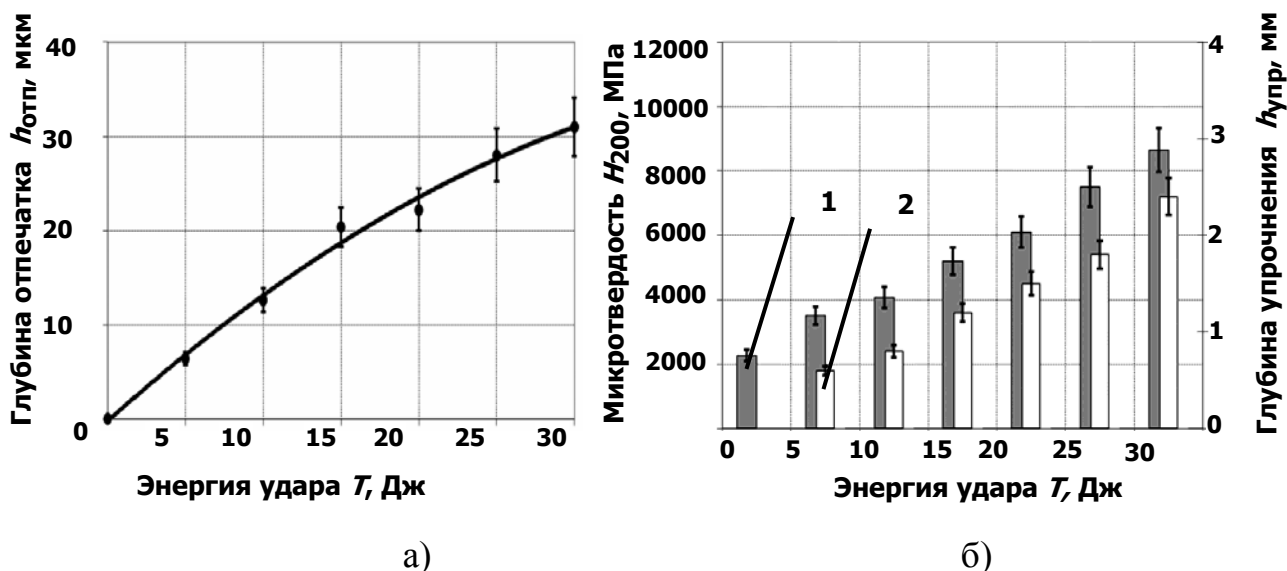


Рис. 5. Влияние энергии удара при воздействии индентором с плоским торцом: а) на глубину отпечатка, б) на микротвердость (1) и глубину упрочнения (2).

Проведенная серия экспериментов, посвященная исследованию влияния пластической деформации на микротвердость, глубину упрочнения и глубину отпечатка при воздействии индентором с цилиндрическим плоским торцом, позволила получить следующие функциональные зависимости:

1) для микротвердости H :

$$H = 1,56T^2 + 161,44T + 2400, \quad (1)$$

где T – энергия единичного удара;

2) для глубины упрочнения $h_{упр}$:

$$h_{упр} = -0,0002T^2 + 0,8T - 0,4, \quad (2)$$

3) для глубины отпечатка $h_{отп}$:

$$h_{отп} = -0,0148T^2 + 1,48T - 0,238. \quad (3)$$

На основе анализа результатов распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя установлено, что при однократном воздействии индентором со сферическим торцом упрочненная часть материала представляет собой форму эллиптического параболоида, а индентором с цилиндрическим плоским торцом – форму, близкую к усеченному конусу, что позволяет использовать математические формулы для определения объема упрочненного материала. Установлено, что в диапазоне энергии удара от 5 до 20 Дж при воздействии индентором с плоским торцом объем упрочненного материала в 1,5-1,8 раза превышает упрочненный объем, полученный индентором со сферическим торцом. В связи с этим, упрочнение поверхности катания головки рельса в зоне сварных соединений рельсов предлагается проводить индентором с цилиндрическим плоским торцом.

Учитывая требования нормативного документа на процесс сварки алюминотермитным способом ТУ 0921-127-01124323-2005, твердость на поверхности катания алюминотермитных сварных соединений рельсов должна быть 380-400 НВ, что соответствует микротвердости 5800-6100 МПа, согласно работам В.К. Григоровича. Как показывают результаты экспериментов, поверхностный слой микротвердостью 5800-6100 МПа формируется при обработке поверхности катания индентором с цилиндрическим плоским торцом радиуса 5 мм с минимально достаточной энергией единичного удара 20 Дж.

На твердость и глубину упрочненного слоя большое влияние оказывают размеры пятна контакта индентора с обрабатываемой поверхностью. Зависимость между площадью контакта S и энергией удара T можно выразить с помощью показателя удельной энергии удара: $[T] = T/S$. Изменение твердости и глубины упрочнения сварных швов в зависимости от удельной энергии удара представлено на рис. 6.

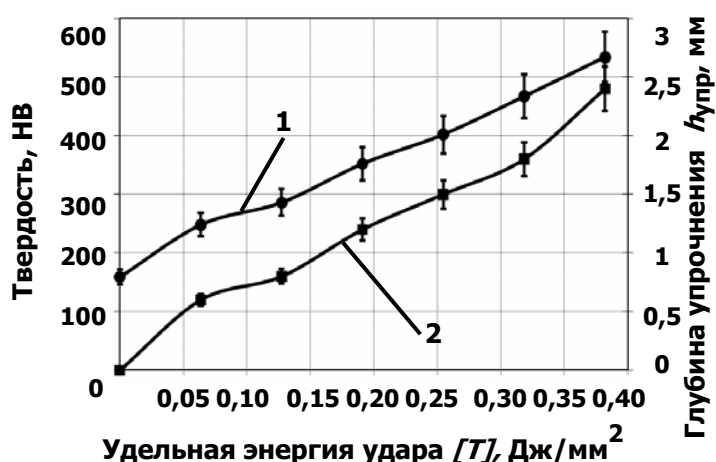


Рис. 6. Зависимость твердости (1) и глубины упрочнения (2)

Твердость сварных швов

алюминотермитных сварных соединений рельсов от удельной энергии удара.

должна быть близкой к твердости объемнозакаленных рельсов и достигать 380-400 НВ. Этому значению твердости соответствует значение удельной энергии удара $0,25 \text{ Дж/мм}^2$, поэтому при выбранной энергии удара 20 Дж площадь индентора должна достигать 80 - 100 мм^2 .

В рамках решаемых в работе задач изучалось влияние пластической деформации на контактно-усталостную прочность алюминотермитных сварных швов. Испытания проводились на установке, позволяющей определить момент образования и динамику развития питтингов. Результаты испытаний на контактно-усталостную прочность упрочненных сварных швов показали, что применение ударного пластического деформирования способствует повышению уровня контактно – усталостной прочности сварных швов на 20-23 % по сравнению с неупрочненными сварными швами.

Анализ результатов исследований, приведенных в разделе 3, свидетельствует о том, что поверхностная пластическая деформация поверхности катания алюминотермитных сварных соединений рельсов является эффективным методом повышения их эксплуатационной стойкости.

В четвертой главе представлены результаты исследования технологической операции удаления литников в зоне подошвы рельса алюминотермитных сварных соединений рельсов. В ходе исследований произведена оценка энергоемкости технологической операции удаления литников, а также проведено моделирование процесса кристаллизации алюминотермитного сварного соединения рельса с целью определения распределения температур в поперечном сечении сварного шва при охлаждении.

При традиционной технологии получения алюминотермитных сварных соединений рельсов металл после окончания заливки его в сварочную форму выдерживают в течение 180 – 240 с, затем в течение 300 - 360 с срезается прибыльная часть сварного шва с головки рельса. После обработки головки рельса сварного шва формируют профиль подошвы рельса. Литники подрубают в горячем состоянии, а после шлифования поверхности катания сварного шва их обрубуют. С целью уменьшения повреждений поверхности подошвы рельса, появляющихся после обрубки литников, предлагается произвести механизацию данной операции и выполнять её в горячем состоянии после съёма прибыльной части сварного шва с головки рельса.

Для определения технологических режимов операции удаления литников в горячем состоянии была построена конечно-элементная модель процесса кристаллизации алюминотермитного сварного соединения, позволившая исследовать изменение температуры сварного шва при охлаждении металла. Для создания конечно-элементной модели была спроектирована 3D-модель алюминотермитного сварного соединения рельса в системе трехмерного моделирования КОМПАС-3D. Моделирование процесса кристаллизации алюминотермитного сварного соединения осуществлялось с помощью программного продукта LVMFlow, в котором на основе метода конечных элементов можно определить значение температуры в любой точке модели и построить температурное поле в выбранном сечении расчетной области (рис. 7).

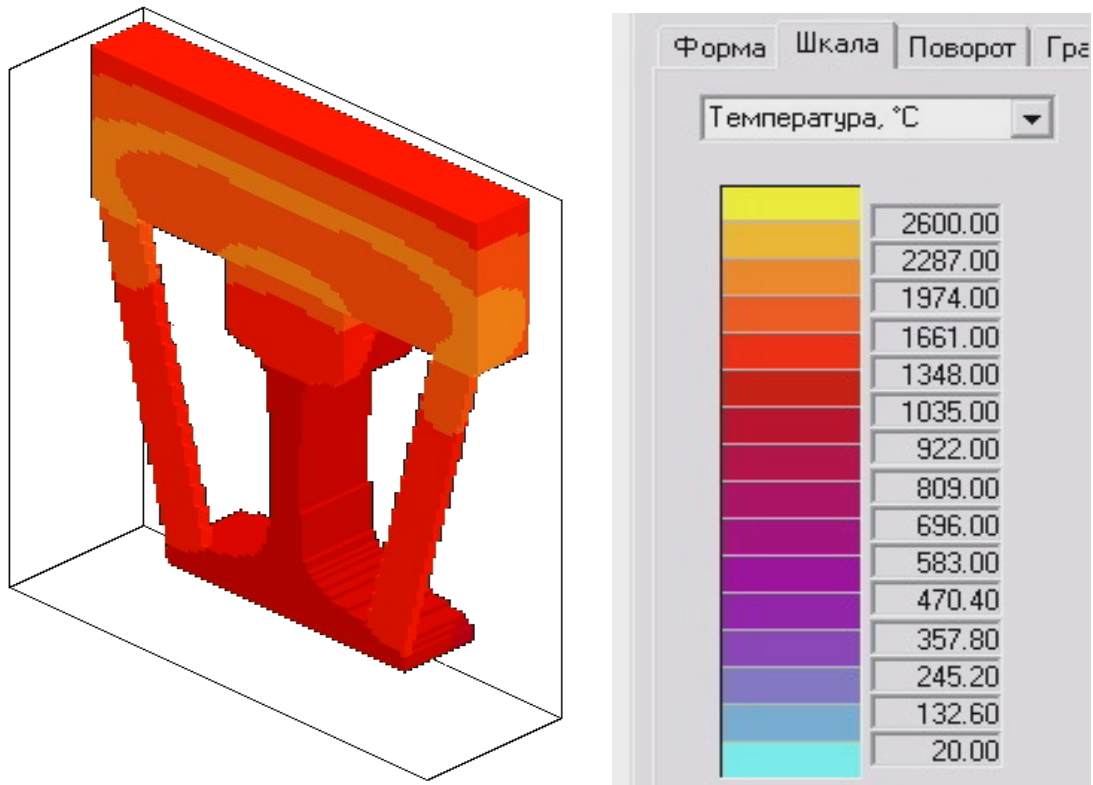


Рис. 7. Конечно-элементная модель кристаллизации алюминотермитного сварного соединения рельса.

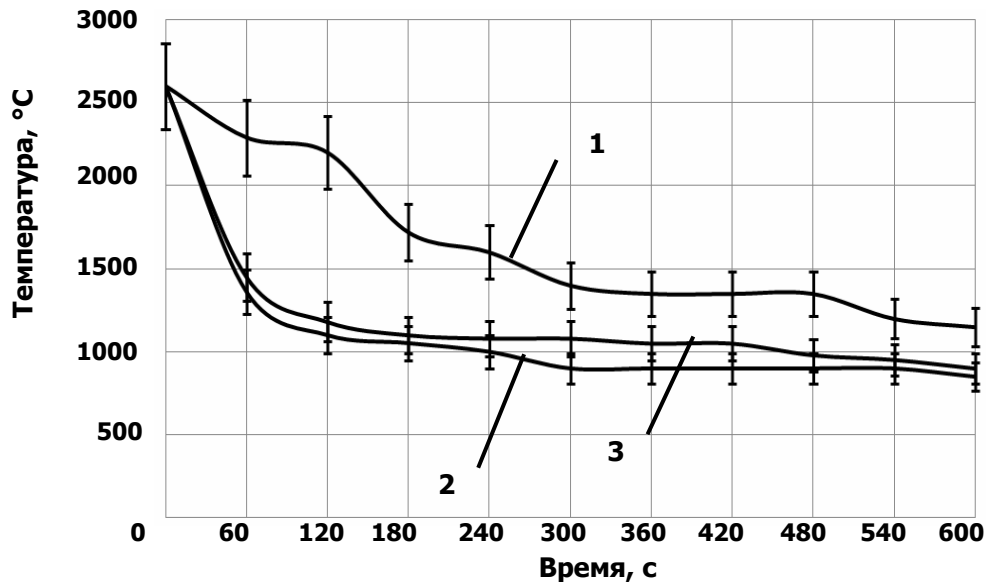


Рис. 8. Распределение температуры в поперечном сечении алюминотермитных сварных швов рельсов в процессе охлаждения:

1 – область поверхности катания головки рельса, 2 - область шейки рельса, 3 – область подошвы рельса.

При моделировании были приняты следующие граничные условия: температура заливаемого металла – 2600 - 2700 °C, температура предварительного подогрева рельс – 800 -900 °C; моделирование процесса начинается с момента

полного заполнения металлом сварочной формы. Распределение температуры в поперечном сечении сварного соединения алюминотермитного сварного соединения рельса оценивали в течение 600 с, с момента заливки металла в сварочную форму до начала операции удаления литников (рис. 8).

В результате моделирования установлено, что температура литника в зоне подошвы алюминотермитного сварного соединения рельса составляет 800 – 900°С на момент совершения операции удаления литников. Полученные результаты позволили рассчитать энергоёмкость технологической операции удаления литников в горячем состоянии, а именно, определить количество ударов для удаления одного литника при заданной энергии удара.

Оценка энергоёмкости осуществлялась по методике, предложенной В.А. Каргиным, которая позволяет рассчитать количество ударов k при динамическом деформировании материала по математическим зависимостям при следующих условиях:

1) деформирование металла имеет упрочняющийся характер:

$$k_1 = \frac{h_{k1}^2 c_1 + 2h_{k1} F_T}{2T}, \quad (4)$$

2) деформирование металла имеет разупрочняющийся характер:

$$k_2 = \frac{2h_{k2} F_T - h_{k2}^2 c_2}{2T}, \quad (5)$$

где h_{k1} – величина перемещения режущего инструмента за один цикл динамического нагружения в зоне упрочнения металла; h_{k2} – величина перемещения режущего инструмента за один цикл динамического нагружения в зоне разупрочнения металла; F_T – величина нагрузки, при которой начинается процесс разупрочнения материала; c_1 – условная жесткость среды при упрочнении металла; c_2 – условная жесткость среды при разупрочнении металла.

Параметры, входящие в математические зависимости 4, 5, определяются по реальной статической нагрузочной $F-x$ характеристике, устанавливающей связь между приложенной нагрузкой F и абсолютной величиной перемещения режущего инструмента x .

Статическая нагрузочная $F-x$ характеристика, показанная на рис. 9, получена с использованием гидравлического пресса. Предварительно нагретые литники до температуры 800-900 °С, зафиксированные в оправке, под действием нагрузки разрезались лопаточным зубилом за время 7-9 с. Величина перемещения инструмента h_k ($h_k = x$) измерялась с помощью индикатора часового типа.

Схематизация нагрузочной $F-x$ характеристики позволяет разбить её на 2 участка. На участке от $0 < h_{kl} \leq 6000$ Н деформирование металла имеет упрочняющийся характер с условной жесткостью $c_1 = \operatorname{tg} \alpha_1$. В этом случае необходимое количество ударов при заданной энергии удара определяется по зависимости 1. После достижения нагрузки $F_T = 6000$ Н, за точкой перегиба

нагрузочной характеристики, начинается процесс разупрочнения, при этом $c_2 = tga_2$, и количество ударов определяется по формуле 2.

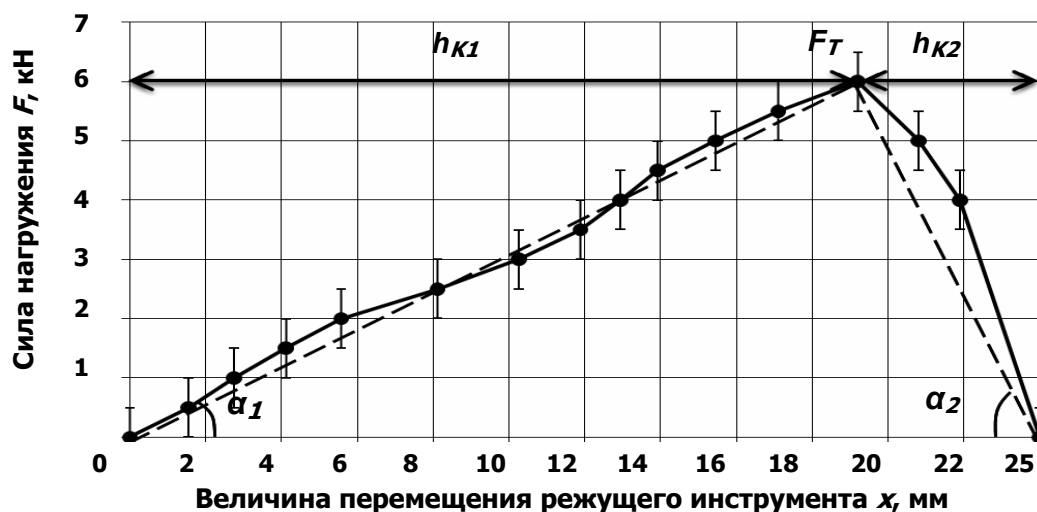


Рис. 9. Нагрузочная F - x характеристика.

При энергии удара $T=20$ Дж, принятой для упрочнения поверхности катания головки рельса в зоне сварных швов, необходимое количество ударов для удаления одного литника составляет 7-8 раз. Энергоемкость операции формирования профиля подошвы рельса в зоне сварных швов составляет 140-160 Дж для удаления литника при температуре 800-900 °С.

С целью проверки возможности использования теоретических зависимостей для расчета режимов удаления литников ударным способом, а также для подтверждения полученного расчетным путем значения количества ударов, проведены экспериментальные исследования. Установлено, что удаление литника в горячем состоянии происходит при 6-8 ударах, что подтверждают расчетные данные.

Пятая глава посвящена разработке устройства для реализации двух операций: упрочнения поверхности катания головки рельса сварных швов и формирования профиля подошвы рельса в зоне сварных швов.

Механическая обработка поверхности катания головки рельса сварных швов выполняется с использованием оборудования, имеющего гидравлический привод. Его применение для срезания литников, требующее перестановки гидроресса в плоскость резания, не представляется возможным. Поэтому в качестве оборудования для формирования профиля подошвы рельса и упрочнения поверхности катания головки рельса в зоне алюминотермитных сварных соединений представляется целесообразным использовать ручную универсальную низкочастотную электромагнитную машину ударного действия, схема которой показана на рис. 10.

Она представляет собой электромагнит, внутри катушки которого перемещается боек, обеспечивающий ударное воздействие через инструмент на обрабатываемую поверхность. Возврат бойка в исходное положение происходит под действием пружины растяжения.

Разработка электромагнита на уровень энергии единичного удара 20 Дж, необходимый для реализации упрочнения поверхности катания головки рельса сварных швов и формирования профиля подошвы рельса в зоне сварных соединений, проведена методом подобия. Критерии подобия, приведенные в работе Ряшенцева Н.П., устанавливают связь между проектируемой машиной и прототипом. В качестве прототипа выбрано устройство для забивки дюбель – гвоздей в строительные основания, представляющее собой машину ударного действия с энергией единичного удара 47 Дж.

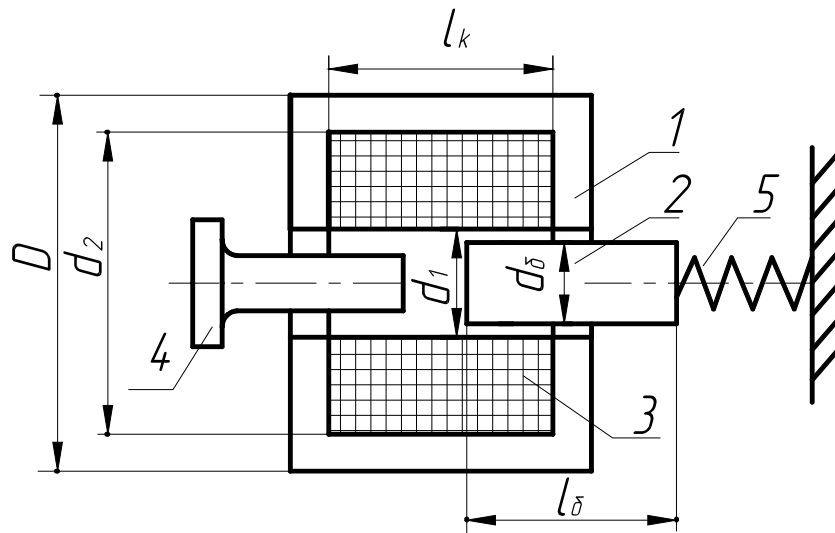


Рис. 10. Схема электромагнита: 1 – магнитопровод, 2 – боек, 3 – силовая катушка, 4 – инструмент, 5 – пружина, D – наружный диаметр, d_b , l_b – диаметр и длина бойка, d_1 d_2 – внутренний и наружный диаметр катушки, l_k – длина катушки.

В соответствии с теорией подобия для механически подобных систем должно выполняться условие:

$$\frac{F_c t_c^2}{m_c \delta_c} = 1, \quad (6)$$

где m_c и δ_c – коэффициенты подобия массы и хода бойка; F_c – коэффициент подобия силы, приложенной к бойку; t_c – коэффициент подобия времени протекания процесса.

Использование критериев подобия для расчета низкочастотных форсированных по току электромагнитов приводит к существенным погрешностям. Расчет по критериям подобия базируется на предположении о полном подобии протекания электромагнитных процессов во времени, т.е. при неизменном временном критерии подобия $t_c = 1$. Но проведенные исследования показали, что для рассматриваемого класса машин $t_c \neq 1$. Поэтому для расчета параметров электромагнита предложена методика их определения по условию минимального полного сопротивления катушки, что как раз и обеспечивает

форсировку электромагнита. При этом из расчета исключается время, определение которого не представляется возможным.

На основании геометрического подобия двух электромагнитов коэффициент подобия кинетической энергии:

$$l_c^3 = \frac{T'}{T}, \quad (7)$$

где T' - энергия удара проектируемой машины; T - энергия удара прототипа.

Согласно теории электротехники, для равнонагруженных машин при одинаковой степени форсировки должна оставаться неизменной плотность тока в обмотке прототипа и проектируемого электромагнита:

$$J' = J = const. \quad (8)$$

Плотность тока в обмотке электромагнита:

$$J = \frac{I}{\sum S_m}, \quad (9)$$

где I – ток в обмотке прототипа, $\sum S_m$ - суммарное сечение обмотки прототипа.

При соблюдении условия (8) коэффициент подобия тока в обмотке:

$$l_c = \frac{I'}{I}, \quad (10)$$

где I' – ток в обмотке проектируемой машины.

После определения тока в обмотке может быть определено число витков обмотки при заданном сечении обмоточного провода:

$$w' = \frac{I'}{S'_m}, \quad (11)$$

где S'_m - сечение обмоточного провода проектируемой машины.

На основании полученных из расчета характеристик, приведенных в таблице, разработана конструкция унифицированного оборудования, представляющего собой ручную электромагнитную низкочастотную машину ударного действия для выполнения двух технологических операций в полевых условиях: упрочнения поверхности катания головки рельса сварных швов и удаления литников в зоне сварных соединений. Переналадка оборудования осуществляется сменой технологических

Таблица
Краткая характеристика электромагнита

Параметр	Значение
Энергия единичного удара, Дж	20
Потребляемая мощность, кВт	0,4
Номинальное напряжение, В	220
Длина бойка, м	$70 \cdot 10^{-3}$
Диаметр бойка, м	$27 \cdot 10^{-3}$
Длина катушки, м	$56 \cdot 10^{-3}$
Наружный диаметр катушки, м	$58 \cdot 10^{-3}$
Внутренний диаметр катушки, м	$30 \cdot 10^{-3}$
Число витков обмотки	174
Сечение обмоточного провода, мм ²	1,4
Масса машины, кг	4

насадок. Ожидаемый годовой экономический эффект от применения предложенного технологического процесса механической обработки алюминотермитных сварных соединений рельсов, согласно расчетам, представленным в диссертации, составляет 320000 рублей в год.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Установлено, что причиной образования дефектов смятия головки рельса в зоне алюминотермитных сварных соединений является пониженное значение твердости на поверхности катания головки рельса сварных швов, которая составляет 220-245 НВ.

2. Экспериментально подтверждено, что введение в технологический процесс механической обработки алюминотермитных сварных соединений рельсов операции ударного пластического деформирования поверхности катания головки рельса способствует повышению контактно-усталостной прочности на 20-23 % по сравнению с существующей технологией механической обработки.

3. Экспериментально установлено, что пластическая деформация алюминотермитных сварных соединений индентором с цилиндрическим плоским торцом радиуса 5 мм при изменении энергии единичного удара от 5 до 30 Дж вызывает увеличение микротвердости от 3500 до 9000 МПа и глубины упрочнения от 0,6 до 2,4 мм.

4. Определен уровень энергии единичного удара, составляющий 20 Дж, необходимый и достаточный для упрочнения поверхности катания головки рельса в зоне сварных швов. При воздействии энергией единичного удара 20 Дж индентором с цилиндрическим плоским торцом радиуса 5 мм на поверхности катания сварных швов формируется упрочненный слой глубиной 1,5-1,7 мм и микротвердостью 5800 - 6100 МПа.

5. Получены зависимости, устанавливающие связь между микротвердостью поверхностного слоя, глубиной упрочненного слоя и энергией единичного удара, позволяющие рассчитывать и прогнозировать физико-механические свойства поверхностного слоя при обработке поверхности катания алюминотермитных сварных соединений рельсов поверхностным пластическим деформированием.

6. Разработана конечно-элементная модель кристаллизации алюминотермитного сварного соединения рельса, позволяющая определить распределение температуры по сечению сварного соединения рельса в процессе его кристаллизации. Результаты моделирования использованы при расчете технологических параметров операции удаления литников в горячем состоянии.

7. На основании анализа процесса формирования профиля подошвы рельса в зоне алюминотермитных сварных соединений рельсов обоснована необходимость механизации технологической операции удаления литников с

целью снижения повреждений поверхности подошвы рельсов, возникающих в процессе обрубки литников ручным способом.

8. На основании математического моделирования технологической операции удаления литников установлено, что энергоёмкость данной операции составляет 140-160 Дж, при энергии единичного удара 20 Дж удаление одного литника осуществляется за 6-8 ударов при температуре 800-900 °С.

9. Разработано технологическое оборудование, в котором используется низкочастотная электромагнитная машина ударного действия с энергией единичного удара 20 Дж, предназначенная для реализации в полевых условиях технологических операций упрочнения поверхности катания головки рельса и удаления литников в зоне подошвы алюминотермитных сварных соединений рельсов.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Виброударное деформирование сварных стыков / В.А. Каргин, Л.Б. Тихомирова, А.Д. Абрамов, М.С. Галай // Путь и путевое хоз-во. 2010. № 6. С. 22 – 23.

2. Каргин В.А., Тихомирова Л.Б., Галай М.С. Упрочнение сварных соединений рельсов методом поверхностного пластического деформирования // Обработка металлов. 2010. № 3 (48). С. 17 – 18.

3. Повышение эффективности механической обработки сварных соединений рельсов / В.А. Каргин, Л.Б. Тихомирова, А.Д. Абрамов, М.С. Галай // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 3 (75). С. 18 – 20.

Публикации в других изданиях:

4. Абрамов А.Д., Галай М.С., Кузнецова Е.С. Повышение качества алюминотермитных сварных рельсовых соединений бесстыкового пути методом виброударного пластического упрочнения // Политранспортные системы: материалы VI Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 21 – 23 апр. 2009 г.: в 2 ч. / Сиб. гос. ун-т путей сообщ. [и др.]. Новосибирск, 2009. Ч.1. С. 5 – 7.

5. Галай М.С. Результаты исследования механических свойств и структуры алюминотермитных сварных соединений // Современные технологии в машиностроении: сб. ст. XIII Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, дек. 2009 г. Пенза, 2009. С. 9 – 11.

6. Галай М.С. Совершенствование технологии и оборудования механической обработки сварных рельсовых стыков // Наука. Технологии. Инновации: материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых: в 4 ч. Новосибирск, 2010. Ч. 2. С. 264 – 266.

7. Каргин В.А., Абрамов А.Д., Галай М.С. Методика расчета ударных узлов с предельными электромагнитными нагрузками // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: тр. конф. с участием иностр. ученых, Новосибирск, 28 июня – 2 июля 2010 г.: в 3 т. / РАН, Сиб. Отд-ние, Ин-т горн. дела. Новосибирск, 2010. Т. 3: Машиноведение. С. 99 – 103.

8. Каргин В.А., Абрамов А.Д., Галай М.С. Проблемы эксплуатации электромагнитных низкочастотных машин в транспортном машиностроении и строительстве // Политранспортные системы: материалы VI Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 21 – 23 апр. 2009 г.: в 2 ч. / Сиб. гос. ун-т путей сообщ. [и др.]. Новосибирск, 2009. Ч. 2. С. 395 – 400.

9. Обработка сварных соединений рельсов виброударным пластическим деформированием / В.А. Каргин, Л.Б. Тихомирова, А.Д. Абрамов, М.С. Галай // Материалы и технологии XXI века: сб. ст. VIII Междунар. науч.-техн. конф., Пенза, март 2010 г. Пенза, 2010. С. 78 – 81.

10. Тюнюкова Т.К., Галай М.С. Совершенствование технологии механической обработки сварных рельсовых стыков // Политранспортные системы: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф., Красноярск, 25 – 27 нояб. 2010 г. Красноярск, 2010. С. 550 – 552.

Подписано к печати 30.09.2011

Объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.

Заказ № 2473

Отпечатано с готового оригинала в издательстве СГУПС
630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191