

На правах рукописи

АЛЕХИН Алексей Леонидович



**ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТЫКОВ, СВАРЕННЫХ
АЛЮМИНОТЕРМИТНОЙ СВАРКОЙ**

Специальность 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и
проектирование железных дорог

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

- 8 ДЕК 2011

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Блажко Людмила Сергеевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Аккерман Геннадий Львович

кандидат технических наук
Николин Аркадий Игоревич

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения»

Защита диссертации состоится «27» декабря 2011 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 218.008.03 при ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет путей сообщения» по адресу: 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9, ауд. 7-520.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Петербургского государственного университета путей сообщения.

Автореферат разослан «25» ноября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н., доцент



Колос А.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. Четкая и ритмичная работа транспорта определяет деятельность практически всех отраслей народного хозяйства. Решающая роль в транспортном комплексе принадлежит железнодорожному транспорту. Железные дороги выполняют около 85% грузовых и 45% пассажирских перевозок.

Согласно Федеральной целевой программе «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года» одним из ключевых моментов, ставших критическими для дальнейшего социально-экономического роста страны, является необходимость повышения безопасности функционирования железнодорожного транспорта.

Основными задачами данной стратегии являются:

- снижение совокупных транспортных издержек, в том числе за счет повышения эффективности функционирования железнодорожного транспорта;
- приведение уровня качества и безопасности перевозок в соответствие с лучшими мировыми стандартами, требованиями экономики и населения на основе технологического и технического развития железнодорожного транспорта.

Диссертационная работа посвящена разработке отдельных задач основных направлений Федеральной целевой программы по обеспечению безопасности движения поездов и надежной работы железных дорог.

Бесстыковой путь является наиболее прогрессивной конструкцией пути. Полное отсутствие стыков создает непрерывную поверхность катания для колес подвижного состава. В современной конструкции бесстыкового пути соединение плетей производится за счет их сварки. Качественная сварка стыков с последующей шлифовкой фактически исключает наличие неровностей на поверхности катания колеса в зоне стыка. При отличном содержании пути практически не возникает каких-либо дополнительных динамических воздействий на пассажиров (полная комфортабельность), уменьшается сопротивление движению поезда на 8-12%, сокращаются расходы на ремонты подвижного состава на 10-12%.

Основной технологией изготовления сварных плетей на российских железных дорогах является их сварка в стационарных условиях на рельсосварочных предприятиях, где используется электроконтактный способ. Этот метод сварки является в настоящее время наиболее качественным и наиболее изученным. Кроме этого метода для сварки рельсов также используются газопрессовая, электродуговая и алюминотермитная сварка.

Алюминотермитная сварка, предложенная русским химиком Н.Н.Бекетовым еще в 1865 году и применявшаяся во многих странах мира, в том числе и в России, вернулась в нашу страну с усовершенствованной технологией и новым качеством.

В представленной работе проведены исследования по изучению качества сварных стыков, выполненных алюминотермитным способом, по результатам измерения твердости поверхности катания головки рельсов на главных путях железнодорожных станций Октябрьской железной дороги, а также на путях территории ЗАО «Логистика-Терминал», примыкающих к станции Шушары.

Цель работы. Целью диссертационного исследования является оценка изменения физико-механических и геометрических параметров стыков, сваренных алюминотермитной сваркой. Для этого были решены следующие задачи:

- 1) установление зависимости изменения твердости металла поверхности катания рельса на основе анализа твердости в зоне стыка и прилегающих к нему участков;
- 2) прогнозирование периодичности шлифовки рельсов, сваренных алюминотермитным способом;
- 3) прогнозирование одиночного выхода рельсов на основании оценки неровностей на поверхности катания рельса в зоне стыка по динамическим показателям сил и ускорений, исследований прямолинейности поверхности катания рельсов в зоне стыков, сваренных алюминотермитной сваркой.

Методы исследования. В качестве методов исследования использованы: эксплуатационные наблюдения и эксперименты, статистический анализ, теоретические и практические расчеты.

Научная новизна состоит в исследовании прямолинейности поверхности катания и твердости металла рельсов в зоне стыков, сваренных алюминотермитным способом; установлении функциональных зависимостей нарастания твердости металла стыка, сваренного алюминотермитной сваркой; создании классификации неровностей поверхности катания рельса в зоне стыков, сваренных алюминотермитной сваркой; разработке методики прогнозирования выхода рельсов, сваренных алюминотермитным способом, в процессе эксплуатации.

Практическая ценность и реализация результатов работы.

1. В ходе работы получены данные экспериментальных исследований неровностей проката колес по рельсам в зоне влияния стыков, сваренных алюминотермитной сваркой.

2. Дано обоснование периодичности шлифовки неровностей после сварки стыков алюминотермитным способом в зависимости от допускаемой скорости движения поездов.

3. Получен поправочный коэффициент для учета динамических сил взаимодействия пути и подвижного состава при расчете прогнозируемого одиночного выхода рельсов, сваренных алюминотермитной сваркой.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались на международном научно-практическом семинаре, посвященном 100-летию со дня рождения профессора С.В.Амелина (4-5 июня 2009 г.), на международном научно-практическом семинаре «Конструкция железнодорожного пути и вопросы технического обслуживания высокоскоростных магистралей» (3-4 июня 2010г.)

В полном объеме работа обсуждалась на заседании кафедры «Железнодорожный путь» Петербургского государственного университета путей сообщения 24 марта 2011 г.

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 3 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованных источников из 93 наименований. Работа изложена на 134 страницах, содержит 35 рисунков, 28 таблиц, 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ.

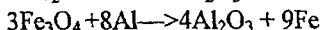
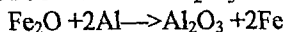
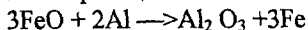
Во введении обоснована актуальность темы и сформулирована направленность работы с учетом задач, определенных Федеральной целевой программой «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года».

В первой главе рассматривается сущность алюминотермитного способа сварки и его развитие с момента его появления до настоящего времени, в том числе рассматриваются различные методы алюминотермитной сварки, использовавшиеся составы алюминотермитной смеси и формулы их определения, а также современные технологии алюминотермитной сварки рельсов.

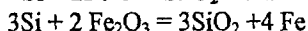
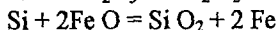
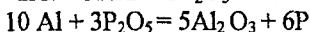
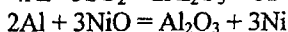
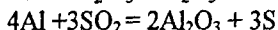
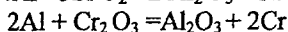
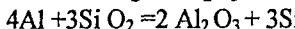
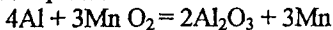
Алюминотермия, или способ восстановления металлов из их оксидов алюминием, основана на том, что теплота образования окиси алюминия (378 ккал на 1г/моль окиси алюминия) значительно больше теплоты образования многих других оксидов. В связи с этим при реакциях алюминия с оксидами металлов выделяется тем больше тепла, чем меньше теплота образования восстанавливаемого оксида. Этой теплоты достаточно для того, чтобы получить в расплавленном состоянии металл, даже если он тугоплавкий, так как температура реакции достигает ~ 3000 °С.

Алюминотермитный метод, термодинамически обоснованный русским химиком Н.Н.Бекетовым в 1865 г., является одним из наиболее крупных его открытий.

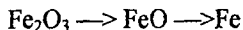
Сварочный термит состоит из порошкообразного металлического алюминия и оксидов железа в виде окалина (технологического отхода горячей обработки стали), а также различных присадок, вводимых в шихту для легирования получаемой стали. Для получения металла (стали) нужного химического состава в шихту вводят в измельченном состоянии легирующие добавки: ферромарганец, ферромolibден, ферротитан, феррованадий, углерод. Измельченная легирующая присадка закладывается в тигель вместе с термическими компонентами. Легирующие добавки повышают прочность термитной стали, так как в ходе реакции, находясь в жидком состоянии, они образуют карбидную фазу легирующих элементов. Наличие в стали перечисленных карбидов увеличивает ее мелкозернистость, повышает твердость и т.п. Получение термитного заливочного металла основано на восстановлении алюминием оксидов тяжелых металлов. При взаимодействии оксидов железа с алюминием протекают объемные реакции:



Наряду с основной термохимической реакцией между алюминием и оксидами железа происходит ряд дополнительных химических реакций:



Оксиды железа во время реакции раскисляются с образованием чистого железа.



При сварке стали в околошовной зоне, нагретой до температуры плавления, образуются следующие участки: неполного расплавления, перегрева, нормализации, неполной кристаллизации, рекристаллизации, участки синеломкости.

Участок неполного расплавления примыкает непосредственно к сварному шву и является переходным от литого металла шва к основному. Он представляет собой узкую область основного металла на границе сплавления.

Участок перегрева - область основного металла, где максимальные температуры при нагреве были выше 1100°C. После охлаждения ниже 723°C на базе крупнозернистого аустенита образуется крупнозернистая феррито-перлитная (или даже мартенситная) структура с пониженными механическими свойствами (низкая пластичность).

Участок нормализации соответствует нагреву до температур 900-1100°C и перекристаллизуется, если температура опускается ниже 723°C, в мелкозернистую ферритно-перлитную структуру. Металл участка нормализации обладает высокими механическими свойствами, так как фазовое превращение проходит на базе мелкозернистого аустенита, не подвергнувшегося перегреву.

Участок неполной перекристаллизации нагревается в пределах температур от 723 до 900°C. В связи с недостаточной длительностью и температурой нагрева структура металла состоит из смеси мелких перекристаллизовавшихся зерен и крупных зерен феррита и перлита, которые не успели перекристаллизоваться. Свойства металла этого участка более низкие, чем участка нормализации.

Участок рекристаллизации наблюдается при сварке сталей, подвергавшихся пластической деформации (прокатке, ковке, штамповке). При нагреве до температуры 450-725°C в этой области основного металла развивается процесс рекристаллизации, приводящий к росту зерна, огрублению структуры и разупрочнению металла.

В участке, нагреваемом до температуры 100-450°C, могут протекать процессы возврата и старения в связи с выпадением карбидов и нитридов железа. Результатом старения является снижение пластичности, вязкости и сопротивления хрупкому разрушению.

Таким образом, металл околошовной зоны характеризуется не только неоднородностью фазового состава и структуры, но и неоднородностью механических свойств. Ширина околошовной зоны зависит от толщины металла, вида и режима сварки.

На настоящий момент наиболее распространенными являются технологии фирм «СНАГА» (Словакия), «Railtech International» (Франция), «ELEKTRO-THERMIT GmbH & Co. KG.» (Германия).

В связи с тем, что технологии различаются незначительно (основными различиями являются время прогрева, доза и состав алюминотермитной смеси), для рассмотрения в диссертационной работе была принята технология фирмы «СНАГА» (Словакия), единственная из перечисленных, разрешенная на момент написания диссертационной работы к использованию на сети железных дорог России. Анализ научно-технической и нормативной литературы по теме диссертационной работы показал, что физико-механические свойства современных стыков, сваренных алюминотермитным способом, являются недостаточно

изученными в связи с тем, что основная часть исследовательских работ по данной теме выполнена в 60-ые годы XX века, а современные работы по изучению алюминотермитной сварки имеют другую направленность.

В условиях современного развития железнодорожного транспорта вообще, и путевого хозяйства в частности, необходимо проведение исследований динамики изменения в зависимости от пропущенного тоннажа геометрии проката колес по рельсам и динамики изменения твердости поверхности катания рельсов в зоне стыков, сваренных алюминотермитной сваркой, с целью определения влияния алюминотермитной сварки на одиночный выход рельсов, создания классификации неровностей в зоне стыков, сваренных алюминотермитной сваркой, установления зависимости изменения твердости металла поверхности катания рельса в зоне стыка, сваренного алюминотермитной сваркой, прогнозирование периодичности шлифовки рельсов.

В ходе анализа существующих источников были определены границы проведения исследования, которые ограничены расстоянием 75 мм от оси сварного шва для оценки изменения твердости металла поверхности катания рельса и 750 мм от оси сварного шва для исследования прямолинейности поверхности катания колеса по рельсу. Выбор схемы контроля твердости (7 отпечатков на расстоянии 25 мм друг от друга вдоль оси рельса и 3 отпечатка вдоль оси сварного шва на расстоянии 15 мм друг от друга) обусловлен различными физико-механическими характеристиками металла по всей длине зоны влияния сварного стыка, за счет различий в структуре кристаллической решетки.

Во второй главе приведены результаты натурных испытаний по определению твердости металла поверхности катания рельсов и ее прямолинейности в зоне стыков, сваренных алюминотермитным способом по технологии фирмы «СНАГА». Для получения экспериментальных данных о твердости стыков проводились измерения твердости металла рельса на поверхности катания в зоне сварного стыка согласно схеме контроля твердости металла литейного шва технических условий (рис. 1), а также на расстоянии 250, 500, 750 мм в обе стороны от оси сварного стыка. Измерения проводились с учетом основного направления движения подвижного состава по пути.

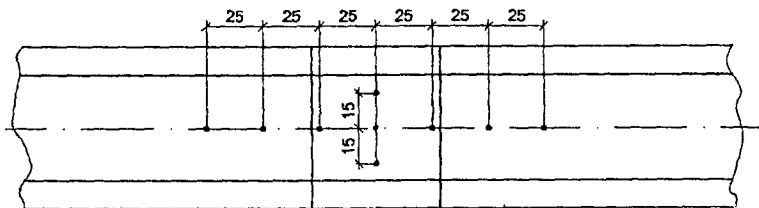


Рис. 1. Схема контроля твердости металла литейного шва.

Измерения проводились на главных путях станций Боровенка, Обухово и Славянка направления Санкт-Петербург – Москва Октябрьской железной дороги – филиала ОАО «РЖД», а также на территории ЗАО «Логистика-Терминал», примыкающего к станции Шушары Октябрьской железной дороги (без пропуска тоннажа по сварным стыкам), сваренных на новых рельсах согласно техническим условиям.

Прямолинейность стыков определялась с помощью траекториографа, разработанного в ЛИИЖТ в 1978 году. Данный прибор позволяет с высокой точностью определить траектории перекатывания колес в зависимости от их износа. В опыте использовались ролики, имитирующие прокат колес с износом бандажа 0 мм и 2,7 мм, что соответствует среднесетевому износу, а также 5 мм, являющимся максимально допустимым значением износа.

В процессе эксплуатации железнодорожного пути существует вероятность появления и горизонтальных неровностей рельсов в зоне сварного стыка. Однако, учитывая нехарактерность данного вида неровностей для участков с высокими скоростями движения, как следствие незначительных боковых сил (отсутствие кривых радиусом менее 1200 м), в дальнейшей работе рассматриваются неровности поверхности катания рельсов в вертикальной плоскости.

На основании проведенных полевых измерений с помощью статистических методов были получены средние значения твердостей и неровностей траекторий в каждой точке при каждой наработке тоннажа, а также среднеквадратические отклонения этих значений и максимально и минимально вероятные значения с вероятностью превышения не более 2%.

На основании проведенного анализа можно сделать выводы о сопоставимости средних значений и доверительных интервалов неровностей проката колеса по рельсу при различном износе бандажа колес.

Приведенные в главе результаты натуральных измерений твердости металла и прямолинейности поверхности катания колеса по рельсу в зоне стыков, сваренных алюминотермитным способом по технологии фирмы СНАГА, являются основанием для дальнейшего решения таких задач диссертационного исследования, как:

- получение коэффициента учета динамических добавок при прогнозировании выхода рельсов, сваренных алюминотермитным способом;
- создание классификации неровностей в зоне стыков, сваренных алюминотермитной сваркой;
- установление зависимости изменения твердости металла поверхности катания рельса в зоне стыка, сваренного алюминотермитной сваркой;

- прогнозирование периодичности шлифовки рельсов, сваренных алюминотермитным способом.

В третьей главе для проведения анализа был составлен сводный график твердости металла поверхности катания в зоне сварных стыков (рис. 2).

С увеличением пропущенного тоннажа твердость на всем протяжении поверхности катания рельсов повышается, что может быть обосновано теорией дислокаций. Однако процесс изменения твердости является неоднородным. Скорости нарастания твердости в зоне влияния сварного стыка и остального рельса различны. Также различными являются скорости нарастания твердости в различных точках зоны влияния. Наиболее интенсивно идет нарастание твердости в точках, удаленных на расстояние 75 мм от оси сварного стыка, что соответствует зоне отпуска металла сварного шва (рис.3).

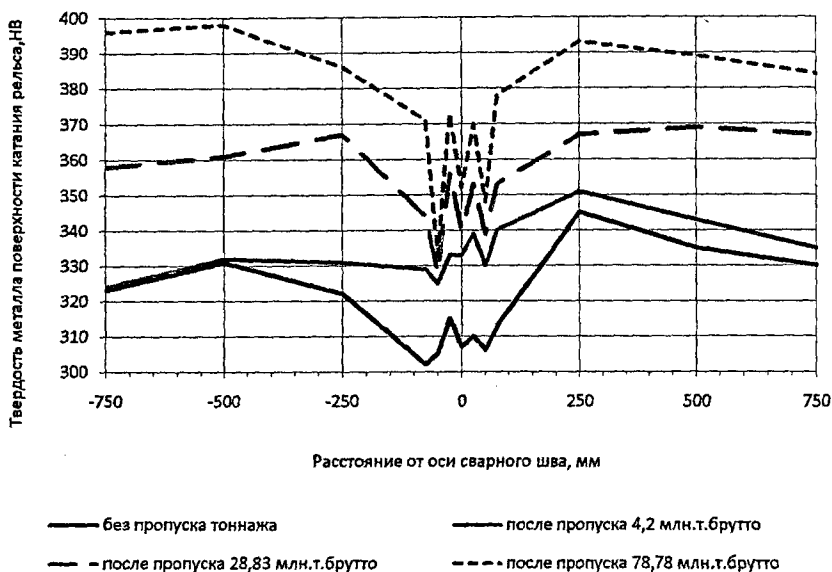


Рис.2. Сводный график твердости металла по поверхности катания стыка.

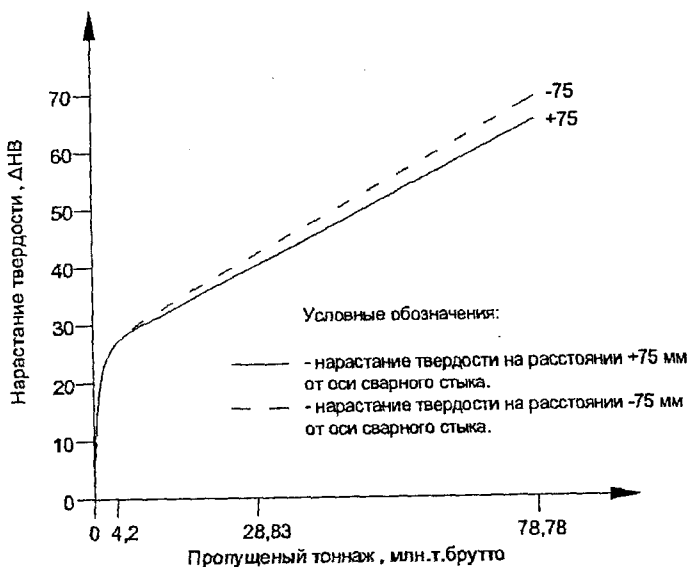


Рис.3. График нарастания твердости в зависимости от пропущенного тоннажа в зоне отпуска металла.

Для зоны отпуска металла характерным является тот факт, что твердость на “отдающем” конце рельса меньше твердости на “принимающем” на 3%. Стоит также отметить, что по мере наработки тоннажа эта разница уменьшится за счет разности скоростей нарастания твердости металла поверхности катания рельса в данных сечениях.

В зоне нормализации, на расстоянии 25 мм от оси сварного стыка, нарастание твердости происходит несколько медленнее, однако скорость этого нарастания выше, нежели в остальных точках зоны влияния сварного стыка. По оси же сварного стыка, а также в зонах рекристаллизации, расположенных на расстоянии 50 мм от нее, нарастание твердости идет менее интенсивно. Если по оси шва и на принимающем конце в зоне рекристаллизации скорости нарастания сопоставимы, то на отдающем конце в данной зоне она ниже, что может быть следствием резкого изменения твердости поверхности катания с более твердого непосредственно на самом рельсе к менее твердому в зоне влияния сварного стыка. На основании полученных данных можно сделать вывод, что местом с наиболее низкой твердостью и скоростью ее нарастания является зона рекристаллизации. Для графиков нарастания во всех зонах является характерным то, что это графики одного вида с различными значениями показателей. Наиболее подходящей для вычисления в данном

случае является функция вида $y = \sqrt[n]{f(x)}$. Для определения зависимости нарастания твердости от пропущенного по стыку тоннажа необходимо решить систему уравнений вида:

$$\begin{cases} y_1 = \sqrt[n]{ax_1^3 + bx_1^2 + cx_1} \\ y_2 = \sqrt[n]{ax_2^3 + bx_2^2 + cx_2} \\ y_3 = \sqrt[n]{ax_3^3 + bx_3^2 + cx_3} \end{cases}$$

где x – значение пропущенного по сварному стыку тоннажа с момента сварки, млн.т. брутто (M_T);

y – значение нарастания твердости при данной наработке тоннажа, НВ (ΔHB).

Уравнение, описывающее предельное состояние нарастания твердости примет вид:

$$\Delta HB = \sqrt[n]{0.4\Sigma T^3 - 4.436\Sigma T^2 + 113.169\Sigma T},$$

где ΔHB – нарастание твердости по стыку, в единицах по Бринеллю;

M_T – пропущенный тоннаж по стыку, сваренному алюминотермитной сваркой, млн.т.брутто.

Для инженерного расчета предлагается выделить на графике 2 зоны:

- 1-я зона характеризуется криволинейным нарастанием твердости и характерна для наработки тоннажа до 5 млн.т.брутто включительно;

- 2-я зона является характерной для наработки тоннажа от 5 до 100 млн.т.брутто, она также криволинейна, однако для упрощения расчетов в первом приближении ее можно принять как прямолинейную, что обеспечивает требуемую в условиях эксплуатации точность расчетов.

Нарастание твердости при наработке тоннажа до 5млн.т. брутто может быть описано функцией вида:

$$\Delta HB_1 = n\sqrt[n]{\Sigma T},$$

нарастание твердости при наработке тоннажа от 5 до 100 млн.т. брутто следует определять по зависимости:

$$\Delta HB_2 = \Delta HB_1 + m(\Sigma T - k)$$

Следует отметить, что в связи с тем, что нарастание твердости происходит с различными скоростями в различных точках, возрастают и перепады твердости между соседними зонами. Наиболее сильно этот перепад выражен между зонами нормализации и рекристаллизации, а также между зонами рекристаллизации и отпуска металла.

Расчитаны эмпирические коэффициенты a, b, c, m, k предлагаемых формул определения прироста твердости металла поверхности катания рельса в зоне стыка, сваренного алюминотермитной сваркой, для зоны рекристаллизации со стороны “отдающего” конца рельса на расстоянии 50 мм от оси сварного шва как для зоны с наименьшей твердостью металла

поверхности катания, а также наименьшей скоростью прироста твердости. Величины этих коэффициентов $a = 0,040$; $b = - 4,436$; $c = 113,169$; $n=10$; $m=0,1$; $k=5$.

В четвертой главе представлены результаты анализа прямолинейности траекторий проката колеса по рельсу в зоне стыков, сваренных алюминотермитной сваркой, при различных значениях износа бандажа колес.

Согласно полученным данным, можно сделать вывод о том, что в ходе эксплуатации стыков, сваренных алюминотермитной сваркой, происходит развитие коротких изолированных неровностей в зоне стыка. Также следует отметить, что эти неровности не являются однотипными. Среди них можно выделить 3 вида: горбы, синусоидальные неровности, впадины (рис.4).

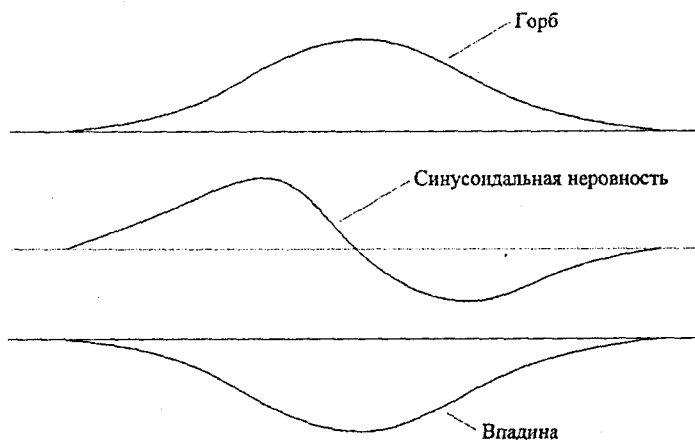


Рис.4. Виды неровностей в зоне сварного стыка.

Траектории проката в зависимости от износа колес меняются неодинаково, и здесь также можно выделить 3 типа: прогрессирующие, то есть те, в которых с увеличением износа бандажа происходит увеличение неровности траектории проката колеса (рис.5); регрессирующие, те, в которых происходит уменьшение неровностей траектории проката колеса при увеличении износа бандажа колес (рис.6); а также те, в которых неровность проката принимает экстремальное значение при среднесетевом износе бандажа колеса (рис.7).

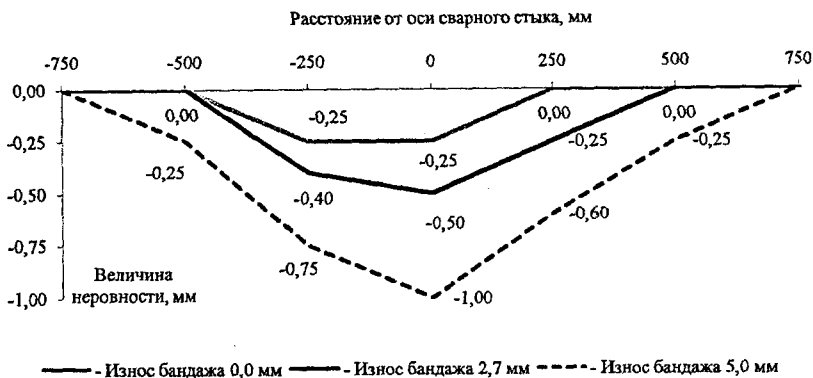


Рис. 5. Прогрессирующие неровности траекторий проката.

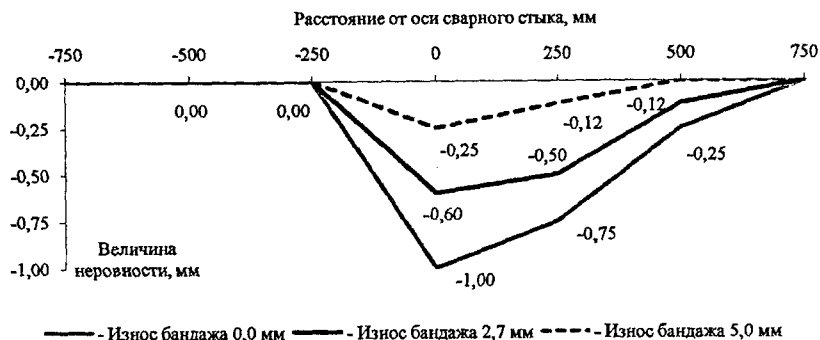


Рис. 6. Регрессирующие неровности траекторий проката.

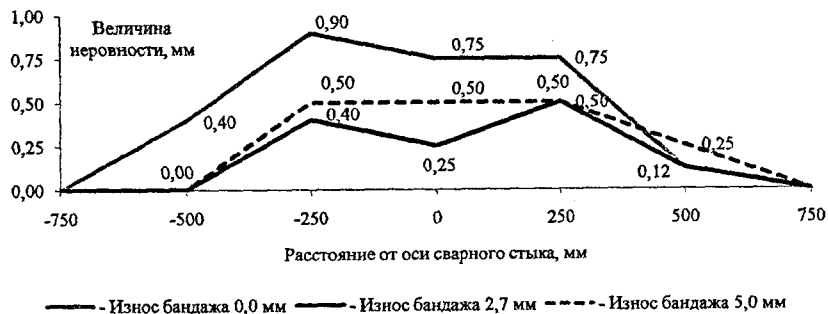


Рис. 7. Неровности траекторий проката с экстремальным значением при среднесетевом износе бандажа.

В условиях развития высокоскоростного движения роль вертикальной геометрии пути в формировании сил взаимодействия системы «колесо-рельс» возрастает.

Исходя из формулы определения динамической добавки при прохождении колесом неровностей пути в зависимости от скорости движения и уклона неровности, а также учитывая предложенные Г.Е.Андреевым допустимые значения динамических добавок, равные для зоны внеболтовых стыков 25 тс для пассажирских и 35 тс для грузовых вагонов, можно обозначить граничные значения скоростей движения в зависимости от уклона неровностей (табл. 1,2).

Таблица 1

Граничные значения скоростей движения вагонов в зависимости от уклона короткой изолированной неровности при значении динамической добавки 25тс.

$i, \%$	$V, \text{км/ч}$	$i, \%$	$V, \text{км/ч}$	$i, \%$	$V, \text{км/ч}$	$i, \%$	$V, \text{км/ч}$
1	213,15	6	82,18	11	57,66	16	45,64
2	148,93	7	75,28	12	54,68	17	43,89
3	120,19	8	69,68	13	52,04	18	42,28
4	102,90	9	65,03	14	49,68	19	40,81
5	91,02	10	61,08	15	47,56	20	39,44

Таблица 2

Граничные значения скоростей движения вагонов в зависимости от уклона короткой изолированной неровности при значении динамической добавки 35тс.

$i, \%$	$V, \text{км/ч}$	$i, \%$	$V, \text{км/ч}$	$i, \%$	$V, \text{км/ч}$	$i, \%$	$V, \text{км/ч}$
1	252,20	6	97,24	11	68,23	16	54,00
2	176,21	7	89,07	12	64,70	17	51,93
3	142,21	8	82,45	13	61,57	18	50,03
4	121,76	9	76,94	14	58,78	19	48,28
5	107,69	10	72,27	15	56,27	20	46,67

Прочность железнодорожного пути определяется сопротивлением деформированию и разрушению как пути в целом, так и его отдельных элементов конструкции. Оценка прочности сводится к расчету факторов, лимитирующих несущую способность конструкции. Такими факторами могут быть следующие: значительные недопустимые деформации, разрушение элементов пути от превышения допустимой нагрузки, постепенное разрушение вследствие износа, в результате ползучести или усталости материала элементов конструкции пути, превышения максимальных допустимых упругих деформаций, потери устойчивости. Наличие в зоне сварного стыка большинства этих факторов послужило в рамках данной диссертационной работы основанием для определения

влияния неровностей в стыках, сваренных алюминотермитной сваркой, на количество отказов рельсов.

Множество экспериментальных графиков распределений наработки рельсов до отказа содержатся в научно-технических отчетах и публикациях ВНИИДЖТа, МИИТа и других организаций. Согласно работам В.С.Лысюка, все они аналогичны по форме и, исходя из общепринятых требований (по простоте, физическому смыслу и минимуму отклонений аппроксимирующих функций от фактических или экспериментальных данных), идентифицируются уравнением

$$h(T, P, \Gamma) = AT^m \left(\frac{P_i}{P_0}\right)^n \left(\frac{\Gamma_i}{\Gamma}\right)^\gamma,$$

где h - отказы рельсов, шт./км; T - наработка, млн. т. брутто; Γ - грузонапряженность на участке млн.т км брутто/км в год; P_i - максимальная нагрузка в цикле нагружения; A, m, n, γ - коэффициенты аппроксимации (положительные константы, определяемые экспериментально).

В уравнении для расчетного прогнозирования накопления одиночных отказов рельсов можно принять $\gamma=0$, так как в пределах реализуемого на железных дорогах изменения частот воздействия колесных нагрузок не выявлено влияние частоты нагружения, т.е. грузонапряженности, на накопление отказов рельсов. Поэтому формула принимает вид:

$$h(T, P) = AT^m \left(\frac{P_i}{P_0}\right)^n$$

Исходя из этих формул, можно сделать вывод о том, что существенное влияние на выход рельсов в пути оказывают динамические нагрузки.

В современном бесстыковом пути одним из наиболее подверженных образованию неровностей мест является зона сварного стыка, что может быть обусловлено неравномерностью упрочнения металла в зоне стыка из-за различной твердости металла зоны сварного стыка и остального рельса, а также наклепом металла в ходе эксплуатации стыков. Измеренный максимальный уклон неровностей в стыках, сваренных алюминотермитной сваркой, после пропуска 80 млн.т.брутто не превышает 5‰, а динамическая добавка при такой величине уклона составляет 22,6 тс и 35,3 тс при скоростях движения 160 км/ч и 200 км/ч соответственно. При статической нагрузке от колеса на рельс 7,5 тс для пассажирского вагона и 15 тс для грузового вагона прохождение колесом таких неровностей при скоростях 160 км/ч и 200 км/ч ведет к кратковременному повышению нагрузки от 2,5 до 6 раз. В связи с этим фактом предлагается использовать в формуле следующие значения P_i в зависимости от наработки тоннажа и

условий эксплуатации бесстыкового пути со стыками, сваренными алюминотермитной сваркой:

1. В работе Б.В.Сорокина был отмечен тот факт, что обычное ускорение колес при динамическом воздействии от колеса на рельс при движении по бесстыковому пути соответствует бг. Исходя из этого факта, предлагается в качестве динамической добавки при базовой нагрузке принять величину воздействия от колеса пассажирского вагона на рельс при данном ускорении – 5,58 тс. Тогда значение динамических сил, используемое в качестве базовой нагрузки P_0 в данных расчетах, а также при надлежащем контроле за геометрией пути в зоне сварных стыков в качестве максимальной нагрузки цикла нагружения P_1 , будет равно 13,08 тс.

2. Учитывая тот факт, что формула изначально была предложена для определения выхода рельсов в зависимости от статических нагрузок от колеса на рельс, наиболее целесообразным является введение дополнительного коэффициента ϑ для учета возрастания динамических сил при прохождении неровностей в зоне стыков, сваренных алюминотермитной сваркой. Данный коэффициент предлагается определять как отношение максимальной динамической нагрузки цикла нагружения ($P_{дин}^{max}$) (табл. 3, 4) к базовой динамической нагрузке ($P_{дин}^{баз}$), равной 13,08 тс, что соответствует динамическому воздействию от колеса пассажирского вагона на рельс при обычном ускорении колес, равному бг при движении по бесстыковому пути. При этом формула примет вид:

$$h(T, P) = AT^m \left(\frac{\vartheta P_1}{P_0} \right)^n$$

Таблица 3

Значение коэффициента ϑ при движении пассажирских вагонов

V, км/ч	20	40	60	80	100	120	160	200
	T, млн.т. брутто	Величина коэффициента ϑ						
25	0,58	0,59	0,62	0,65	0,70	0,75	0,89	1,06
50	0,58	0,61	0,66	0,73	0,82	0,93	1,20	1,56
75	0,59	0,63	0,71	0,81	0,95	1,11	1,53	2,06
100	0,59	0,65	0,75	0,89	1,07	1,29	1,85	2,58
125	0,60	0,67	0,80	0,98	1,20	1,48	2,19	3,10
150	0,60	0,70	0,85	1,06	1,34	1,67	2,53	3,63
175	0,61	0,72	0,90	1,15	1,47	1,87	2,87	4,17
200	0,61	0,74	0,95	1,24	1,61	2,06	3,22	4,71

Значение коэффициента ϑ при движении грузовых вагонов

V, км/ч	20	40	60	80	100	120
T, млн.т. брутто	Величина коэффициента ϑ					
25	1,15	1,17	1,19	1,22	1,27	1,32
50	1,16	1,19	1,24	1,30	1,39	1,50
75	1,16	1,21	1,28	1,39	1,52	1,68
100	1,17	1,23	1,33	1,47	1,65	1,87
125	1,17	1,25	1,37	1,55	1,78	2,06
150	1,18	1,27	1,42	1,64	1,91	2,25
175	1,18	1,29	1,47	1,72	2,05	2,44
200	1,19	1,31	1,52	1,81	2,18	2,64

Основные результаты и выводы по работе.

В работе проведен анализ существующих публикаций по теме диссертации.

С целью изучения изменения физико-механических свойств стыков, сваренных алюминотермитной сваркой, по их длине получены данные распределения твердости металла поверхности катания рельсов в зоне влияния сварного стыка с учетом направления движения подвижного состава при различных наработках тоннажа.

В ходе работы установлено, что в процессе эксплуатации стыков, сваренных алюминотермитным способом, происходит нарастание твердости металла поверхности катания рельса в зоне стыка. Процесс нарастания твердости не является однородным. В различных сечениях скорость нарастания твердости различна. Для дальнейшего изучения механизма изменения твердости металла были составлены графики нарастания твердости металла поверхности катания рельсов в зоне влияния алюминотермитной сварки на расстояниях 75, 50, 25 мм от оси сварного стыка с учетом направления движения подвижного состава, а также по оси сварного стыка в трех точках: по оси рельса и на расстоянии 15 мм в сторону рабочей и нерабочей граней рельса в зависимости от величины пропущенного тоннажа.

С целью прогнозирования изменения твердости металла поверхности катания рельса в зоне влияния стыков, сваренных алюминотермитной сваркой, в зависимости от пропущенного тоннажа предложена формула прироста твердости металла поверхности катания рельса в зоне влияния стыка сваренного алюминотермитной сваркой:

$$\Delta H B = \sqrt[2]{a \Sigma T^3 - b \Sigma T^2 + c \Sigma T}.$$

Для инженерного расчета нарастания твердости металла поверхности катания предложены формулы:

$\Delta HB_1 = n\sqrt{\sum T}$ – нарастание твердости при наработке тоннажа до 5 млн.т. брутто;

$\Delta HB_2 = \Delta HB_1 + m(\sum T - k)$ – нарастание твердости при наработке тоннажа от 5 до 100 млн.т.брутто;

Расчитаны эмпирические коэффициенты a, b, c, m, k предлагаемых формул определения прироста твердости металла поверхности катания рельса в зоне стыка, сваренного алюминотермитной сваркой, для зоны рекристаллизации со стороны “отдающего” конца рельса на расстоянии 50 мм от оси сварного шва, как для зоны с наименьшей твердостью металла поверхности катания, а также наименьшей скоростью прироста твердости. Величины этих коэффициентов $a = 0,040$; $b = - 4,436$; $c = 113,169$; $n=10$; $m=0,1$; $k=5$.

Составлена классификация неровностей в зоне стыка по их геометрическим размерам, а также по их изменению в зависимости от износа колес подвижного состава, что может послужить основанием для дальнейшего анализа доли каждого из видов неровностей в общей массе, их влияния на взаимодействие пути и подвижного состава и разработки дополнительных рекомендации по увеличению срока службы рельсов, сваренных алюминотермитной сваркой.

С целью уменьшения динамических сил взаимодействия колеса и рельса и как следствие увеличения срока их службы даны рекомендации по назначению дополнительной шлифовки рельсов в зоне влияния стыков, сваренных алюминотермитной сваркой, в зависимости от скоростей движения: при скорости 200 км/ч – после пропуска 25 млн.т.брутто, при скорости 140 км/ч – после пропуска 40 млн.т.брутто, при скорости 100 км/ч – после 70 млн.т.брутто и при скорости движения 60 км/ч – 160 млн.т.брутто.

Проведенные исследования изменения физико-механических и геометрических параметров стыка, оказывающих влияние на величину динамического воздействия на путь, позволяют рекомендовать при текущем содержании пути применение технологии, позволяющей предупреждать развитие дефектов в рельсах в местах сварки стыков алюминотермитным способом. Это приведет к снижению эксплуатационных расходов на текущем содержании для данной конструкции верхнего строения пути на величину от 23,6% до 51,5%.

Для расчетного прогнозирования накопления одиночных отказов рельсов, сваренных алюминотермитным способом, предложен коэффициент для учета динамических добавок от неровностей в зоне стыков, сваренных алюминотермитной сваркой.

Изменение методики расчета выхода дефектных рельсов для участков пути, сваренных алюминотермитным способом, позволит уменьшить объем внеплановых работ по устранению дефектных рельсов, что повлечет за собой снижение экономических потерь дороги, в первую очередь за счет уменьшения количества неграфиковых ограничений скорости в среднем на 421,7 тыс.руб. на 1 км в год.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Параметры твердости стыков сваренных алюминотермитной сваркой / А.Л. Алехин // Известия ПГУПС. – 2010. – с. 51- 56
2. Неровности в стыках, сваренных алюминотермитной сваркой: параметры и их влияние. / А.Л. Алехин, Л.С. Блажко // Международный научно-практический семинар «Конструкция железнодорожного пути и вопросы технического обслуживания высокоскоростных магистралей» (3-4 июня 2010 г.): Сборник научн. трудов. – СПб.: ПГУПС., 2010. – с. 50- 55
3. Твердость стыков сваренных алюминотермитным способом. / А.Л. Алехин, Л.Н. Фролов // Международный научно-практический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения профессора Амелина С.В. (4-5 июня 2009 г.): Сборник научн. трудов. - СПб.: ПГУПС., 2009. – с. 35-38

Подписано к печати 22.11.2011

Печать – ризография. Бумага для множит. ашп.

Тираж 100 экз. Заказ 1057.

Печ.л. 1,25

Формат 60x84 1/16

ПГУПС 190031, г. С-Петербург, Московский пр.,9