

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ, УПРОЧНЕННЫХ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ

С. И. Медведев, М. В. Гречнева, А. Е. Балановский

Национальный исследовательский

Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск, Россия

Исследовано упрочнение боковой поверхности головки рельсов с использованием оптической и электронной микроскопии. Приведены результаты промышленных испытаний. Плазменное упрочнение боковой поверхности рельса позволяет получить благоприятную структуру поверхностного упрочненного слоя с оптимальными твердостью и толщиной закаленного слоя. Это даёт возможность значительного увеличения ресурса эксплуатации рельсов за счет снижения интенсивности изнашивания боковой поверхности рельса в 2 – 3 раза.

Ключевые слова: боковой износ рельсов, плазменное упрочнение, плазменная установка, твердость закаленного слоя, глубина и ширина закаленного слоя, металлография

METALLOGRAPHIC INVESTIGATIONS AND PERFORMANCE TESTING OF RAILS, HARDENED HARDENING PLASMA TREATMENT

S. I. Medvedev, M. V. Grechneva, A. E. Balanovsky

National research Irkutsk state technical university, Irkutsk, Russia

Hardening lateral surface of a head of rails with use of optical and electronic microscopy is investigated. Results of industrial tests are given. Plasma hardening of a rail lateral surface allows to receive favorable structure of the superficial strengthened layer with an optimum hardness and thickness of the tempered layer. That gives the chance of significant increase in a resource of operation of rails due to decrease in intensity of wear of a lateral surface of a rail by 2–3 times.

Keywords: side rail wear, plasma hardening, plasma installations, the hardness of the hard-ened layer depth and width of the hardened layer, metallography

В процессе движения подвижного состава возникает как адгезивный, так и абразивный износ трибопары колесо – рельс. Первый из них вызывает разрушения из-за схватывания контактирующих поверхностей рельсов и гребней колес при их взаимном скольжении. Эти разрушения связаны с изменением структуры поверхностных слоев вследствие существенной пластической деформации, окисления, отделения и смещения частиц материала рельса и гребней колес. Абразивный боковой износ рельсов и гребней колес в зонах их контактов характеризуется стачиванием частиц материала вследствие воздействия абразивных частиц, а также вследствие воздействия (при взаимном скольжении) шероховатой твердой поверхности гребня колеса на боковую

грань головки и наоборот. В настоящее время для изготовления железнодорожных рельсов с целью повышения их циклической прочности, износостойкости и увеличения ресурса работы используют стали с высоким содержанием углерода (например, сталь марки М76 с содержанием углерода 0,71–0,82 %). Необходимый уровень прочностных и пластических свойств ($\sigma_s \geq 1100$ МПа, $\delta_5 \geq 6$ %, $\psi \geq 15$ %, $HB \geq 3210$ МПа) в исходной стали достигается за счет использования сложных режимов термомеханической обработки (нормализации, закалки, высокого отпуска) в процессе ее изготовления. Известно, что для повышения эксплуатационной долговечности рельсов необходимо повысить твердость в зоне бокового износа рельса [1].

Одним из способов повышения твердости является поверхностное упрочнение высококонцентрированным источником энергии – сжатой плазменной дугой газового разряда. Особенностью плазменной поверхностной закалки является кратковременность процесса нагрева, обеспечивающая высокую интенсивность ввода тепла в изделие, что оказывает существенное влияние на структуру закаленного слоя. Применение быстрого нагрева, способствующего формированию более мелкой структуры закаленной стали, дает возможность получить более благоприятное сочетание прочности и вязкости [2, 3].

Данная статья посвящена исследованию возможности плазменного поверхностного упрочнения боковой поверхности рельса применительно к условиям ВСЖД с учетом особенностей структурообразования и структурных превращений в упрочненном поверхностном слое металле рельсовой стали М76.

Оборудование и материалы для проведения исследования. Для проведения исследовательских работ по упрочнению зо-

ны износа боковой поверхности рельса разработана плазменная установка (рисунок 1). Для отработки предварительных оптимальных параметров плазменного упрочнения изготовлены образцы, на которых исследовалось воздействие плазменной дуги на поверхность головки рельса. Подбор параметров на специализированной установке осуществлялся варьированием сварочного тока, расхода рабочего газа, скоростью перемещения плазматрона и расстоянием от нижней поверхности плазматрона до боковой поверхности рельса (таблица 1) [4].

Электронно-микроскопические исследования проведены на базе ИргТУ с помощью растрового электронного микроскопа JIB-4501 JEOL – многолучевой системы, оснащенной электронной и ионной пушкой JIB-4501 в комплекте с беззотной системой энергодисперсионного микроанализа и просвечивающего электронного микроскопа Tescan G2 20F S-TWIN FEI. Фотографирование макроструктур образцов осуществлялось на металлографическом микроскопе МИМ-7. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3.

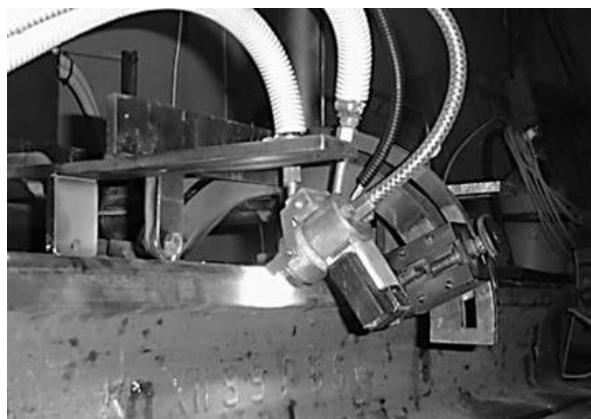
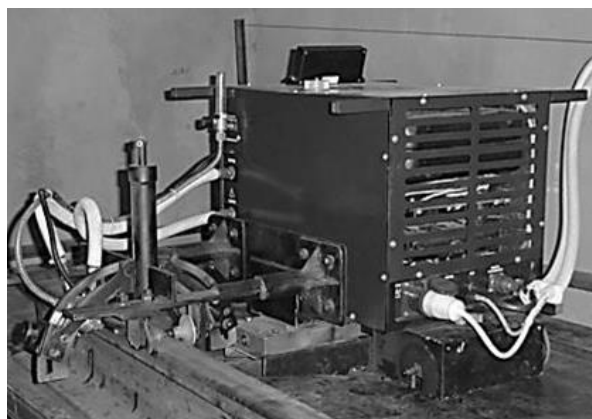


Рисунок 1 – Установка для плазменного упрочнения боковой поверхности головки рельса верхнего строения пути

Таблица 1 – Оптимальные параметры упрочнения боковой поверхности головки рельса

Номер режима	Расход аргона, л/ч	Условный коэф-т рассеивания магнитного поля	Напряжение, В	Сила тока, А	Скорость упрочнения, м/ч	Расстояние от плазматрона до поверхности рельса, мм	Твердость по Викерсу, HV
1	6,6	7	52	48	18,0	14	745–800
2	6,4	6	50–54	52–54	22,0	14	695–745
3	6,8	6	56–58	60	21,6	16	655–695
4	6,4	6	56–58	60	36,0	18	615–855
5	6,0	6	56–58	85	28,8	22	585–900

Металлографические исследования.

Для проведения металлографических исследований из каждой упрочненной рельсовой пробы был вырезан поперечный микрошлиф, на котором проводилось исследование микроструктуры и измерение твердости по глубине упрочненного слоя. Проведенные исследования показали, что структура упрочненного слоя состоит из смеси троостита, бейнита, остаточного аустенита и мартенсита в разном количественном соотношении. Измерения твердости по Виккерсу и микротвердости по глубине упрочненного слоя в целом подтвердили результаты предварительных замеров твердости переносным твердомером. Твердость в упрочненном слое рельсовых проб колебалась в пределах 590–915 HV. Металлографические исследования показали, что глубина закаленных слоёв на всех образцах составляет 2–2,5 мм. Основной составляющей ($\approx 93\%$) в структуре матрицы закаленной рельсовой стали является α -фаза, которая характеризуется следующими значениями: параметр кристаллической решетки 0,28702 нм, статические смещения атомов – 0,02 нм, измеренный уровень микронапряжений II рода 650–710 МПа, твердость по Виккерсу HV₁₀ 803–924. Структура α -фазы представляет собой смесь пакетного (или реечного), пластинчатого (низкотемпературного и высокотемпературного) мартенсита и бейнита (рисунок 2). Пакетный (или реечный) мартенсит занимает основную долю α -матрицы ($\approx 80\%$). Пластинчатый мартенсит – это второй самостоятельный морфологический тип α -матрицы исследуемой рельсовой стали. Особенностью этого типа мартенсита в упрочненном слое является то, что он представляет собой отдельно расположенные кристаллы мартенсита – пластины, как правило, не образующие параллельных пачек, что наблюдается в пакетном мартенсите. Поперечный размер пластин больше поперечного размера отдельной рейки примерно на порядок и составляет величину ≈ 1 –3 мкм. Отдельные мартенситные пластины встречаются двух видов:

1) большие пластины, длина которых достигает 10–15 мкм,

2) малые пластины длиной 0,5–1,5 мкм. Большие пластины лежат друг к другу под некоторыми углами и пронизывают практически все зерно.

Размер пластин ограничивается либо границами зерна, либо другой большой пластиной, образовавшейся в этом же зерне. Размер же малых пластин ограничен большими пластинами и пакетами реек. Кроме того, в исследуемой рельсовой стали в упрочненном

слое, практически в подповерхностном тонком слое 0,25 мкм, присутствует еще один вид пластинчатого мартенсита, бесструктурный по форме (рисунок 2в), не содержащие внутри себя ни реек, ни пластин, ни других четко обозначенных границ раздела. Располагаются такие области либо на стыках пакетов, либо на стыках пакетов и пластин. По-видимому, большие пластины и пластины в виде бесструктурных областей образовались при более высоких температурах мартенситного превращения и поэтому относятся к высокотемпературному мартенситу. Малые пластины, образовавшиеся при более низких температурах, – к низкотемпературному мартенситу. Между основным металлом рельсовой стали и закаленным слоем имеется переходная зона со структурой смеси троостита, бейнита и мартенсита с твердостью по Виккерсу HV₁₀ 421–582. Установлено, что в результате охлаждения образцов после проведенной закалки происходит частичный «самоотпуск», сопровождающийся выделением внутри мартенситных кристаллов дисперсной фазы – частиц карбида железа. Необходимо отметить, что если весь пластинчатый мартенсит (как высоко-, так и низкотемпературный) находится в состоянии частичного «самоотпуска», то в пакетном мартенсите процессы «самоотпуска» развиваются неодинаково: наряду с «самоотпущенным» пакетным мартенситом, объемная доля которого составляет $\approx 60\%$ от общего объема α -матрицы, в материале присутствуют рейки и даже целые пакеты, в которых процессы «самоотпуска» практически полностью отсутствуют. Такой пакетный мартенсит является дислокационным (или безкарбидным) и образуется в результате мартенситного превращения. Объемная доля дислокационного мартенсита в материале $\approx 20\%$ от общего объема α -матрицы. Третий самостоятельный морфологический тип α -матрицы исследуемой стали – бейнит, количество которого не превышает 10%. Установлено, что остаточный аустенит в пакетном и пластинчатом низкотемпературном мартенсите располагается по границам мартенситных кристаллов в виде длинных тонких прослоек. В пластинчатом высокотемпературном мартенсите он располагается внутри мартенситных кристаллов и имеет вид «островков» или «игл». В бейните остаточного аустенита не обнаружено. Объемная доля остаточного аустенита ≈ 10 –18%. Отметим, что его большая часть ($\approx 16\%$) находится в пакетной составляющей мартенсита, а наименьшая часть ($\approx 1,5\%$) – в пластинчатом высокотемпературном мартенсите. Размеры частиц, плотность распределения и объемная

доля в различных морфологических составляющих мартенсита «самоотпуска» различны. Самые мелкие частицы цементита (8×12 нм) образуются в пакетном мартенсите, самые крупные (40×110 нм) – в пластинчатом высокотемпературном мартенсите. **Микротрещин и других дефектов в закаленном слое, полученном в результате плазменной закалки, и переходной зоне к основному металлу не обнаружено.** На границе перехода дорожки плазменной закалки к основному металлу структура состоит из троостосорбита. Микроструктура основного металла рельсовой стали на расстоянии 5,0 мм от закаленного слоя состоит из сорбита закалки и феррита с твердостью HV_{10} 370, что соответствует ГОСТ Р 51685-2000. С увеличением скорости упрочнения до 45 м/ч и повышения тока до 120 А в исследуемых образцах при режиме микроплавки зафиксированы следующие особенности обработки: на глубине 0,1–0,18 мкм от поверхности в малых (размером единицы микрометров) зернах, как и в крупных, формируются кристаллы пакетного (речного, дислокационного) и пластинчатого двойникового (низкотемпературного) мартенсита. Средний размер пакетов составляет ≈ 1 мкм, поперечный размер кристаллов пакетного мартенсита – 35–80 нм. Просвечивающая электронная микроскопия свидетельствует о формировании при плазменном упрочнении в тонком поверхностном закаленном слое (рисунок 2в), ультрадисперсной структуры, состоящей из значительно разориентированных отдельных кристаллитов (фрагментов) α -фазы с размерами менее 100 нм, что позволяет отнести рассматриваемые структуры к нанокристаллическим. Кристаллы пластинчатого мартенсита имеют значительно более широкий спектр поперечных размеров, от 50 до 300 нм. Наряду с пакетным и пластинчатым мартенситом в объемах фольги со сравнительно мелкими зернами обнаруживаются области α -фазы (зерна) с четкой огранкой, размер которых составляет $\approx 0,5$ –1 мкм (рисунок 2е). В объеме таких областей наблюдается сетчатая дислокационная субструктура, скалярная плотность дислокаций $\approx 3,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Таким образом, на основании проведенных металлографических исследований поверхностного слоя рельсовой стали М76 на различных режимах плазменного упрочнения можно сделать следующие выводы:

- в упрочненном слое установлено формирование нескольких морфологических структур: мелкодисперсного мартенсита, бейнита и остаточного аустенита;

- в переходной зоне к основному металлу зафиксированы структуры сорбита, троостита и пластинчатого перлита;

- обнаружены остаточные напряжения II рода, которые оказывают наибольшее влияние на величину микротвердости;

- макро- и микротрещин в упрочненном слое не зафиксировано.

Эксплуатационные испытания. Испытания упрочненных плазменной закалкой рельсов на циклический изгиб проводились во ВНИИЖТе на гидропульсаторе типа ЦД-200/400 ПУ, работающем с частотой нагружения 300 циклов в минуту. При этих испытаниях рельсовая проба устанавливается головкой вниз горизонтально на две опоры гидропульсатора, расстояние между которыми составляет 1,0 м, и циклически нагружается посередине пролета сосредоточенной нагрузкой с асимметрией цикла нагружения $R = 0,1$.

Испытания на циклический изгиб упрочненных рельсов проводились при максимальной нагрузке 54 тс, при которой согласно действующим Нормам безопасности рельсовая проба должна выдержать без признаков разрушения 2 млн. циклов нагружения. Наилучшие результаты показала рельсовая проба, упрочненная по режиму 2 (таблица 1) – более 2 млн. циклов нагружения.

Для проведения эксплуатационных испытаний были обработаны партии рельсов по режиму 2 (таблица 1), которые в дальнейшем были уложены в кривые радиусом 300 м на участке Иркутск–Слюдянка ВСЖД [3,4]. Параллельно были уложены не упрочненные рельсы, за которыми велось наблюдения на протяжении 12–18 месяцев. Для получения качественной картины износа использовали метод слепков профиля рельса [3]. По завершению опытных испытаний закаленного рельса в пути установлено, что износ опытного рельса за первые три месяца составил 0,6–0,7 мм (рисунок 3), тогда как износ серийного рельса за этот период эксплуатации составляет 4–6 мм; до сверхнормативного износа (18 мм) срок эксплуатации обычного рельса составил 15 месяцев, в то время как боковой износ рельса с упрочненной гранью головки составил 1–1,5 мм. Интенсивность изнашивания рельсов с плазменным упрочнением значительно ниже, чем у серийных – в 2–3 раза (рисунок 4). Технология закалки рельсов позволит улучшить механические свойства, а также снизить коэффициент трения в контакте гребня с боковой поверхностью рельса и повысить трещиностойкость материала рельса в зоне плазменного упрочнения.

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ, УПРОЧНЕННЫХ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ

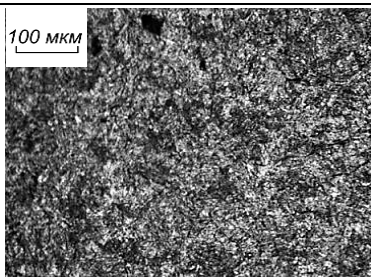
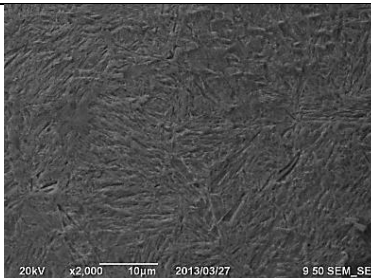
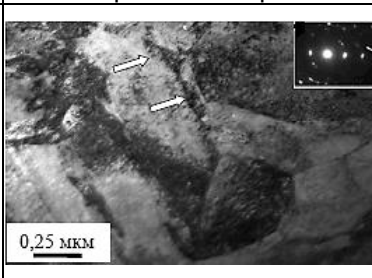
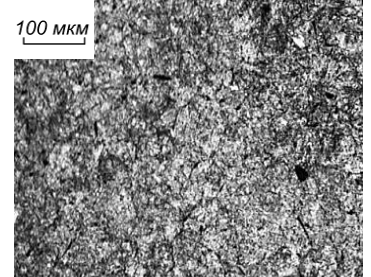
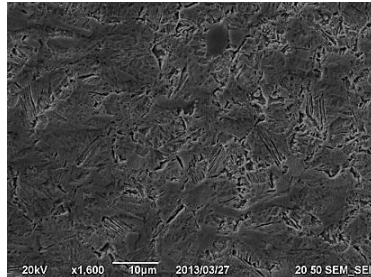
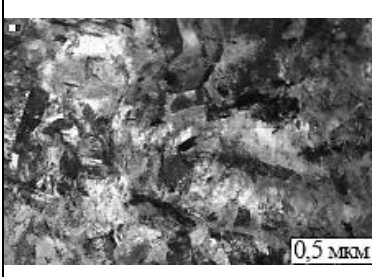
	Оптический микроскоп	Электронный микроскоп	Просвечивающий электронный микроскоп
УЗ			
	а	б	в
ПЗ			
	г	д	е
Стрелками указаны кристаллиты α -фазы пластинчатой морфологии на в и расщепленный рефлекс типа (330) α -Fe). УП – упрочненная зона, ПЗ – переходная зона к основному металлу			

Рисунок 2 – Структура упрочненного слоя рельсовой стали при различных методах металлографии

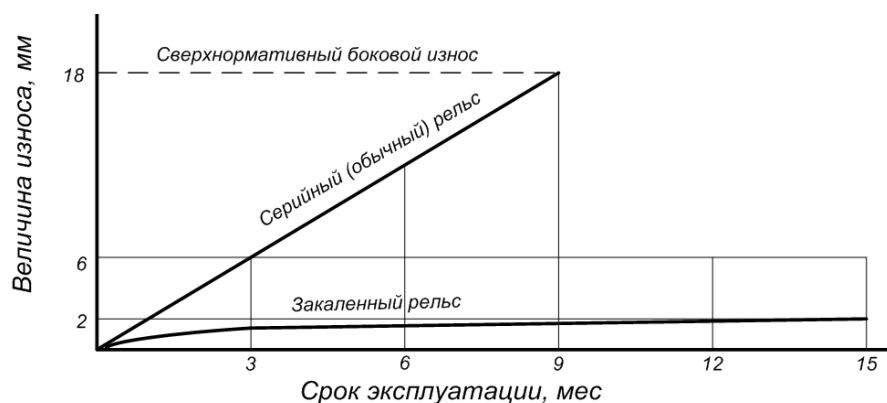


Рисунок 3 – Зависимость величины бокового износа рельса от срока эксплуатации

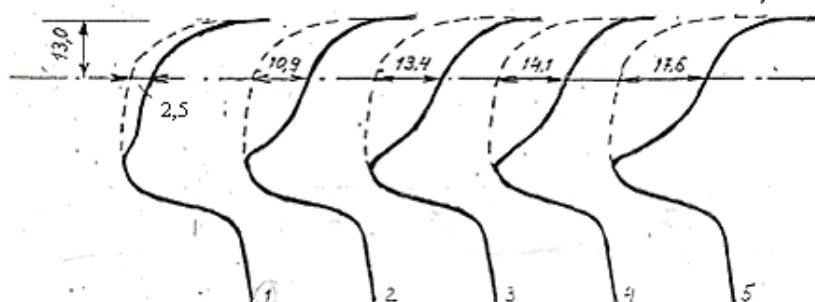


Рисунок 4 – Поперечные профили головки рельса кривой радиуса 300м в процессе эксплуатации 10 месяцев: 1 – упрочненный рельс; 2, 3, 4, 5 – неупрочненный рельс

Проведенные исследования показали, что поверхностное упрочнение с применением низкотемпературной плазмы обеспечивает формирование высокопрочной структуры и свойств рельсовой стали, которые пока недостижимы при традиционных способах термической обработки рельсов на заводах производителей.

Выводы.

1. Разработанная установка плазменного поверхностного упрочнения рельса (ПУР-1), обеспечивает на оптимальных режимах обработки качественное поверхностное упрочнение по ширине, глубине и твердости поверхностного слоя металла.

2. Плазменное упрочнение боковой поверхности рельса позволяет получить благоприятную структуру поверхностного упрочненного слоя (смесь троостита, бейнита и мартенсита) твердостью 450–830 НВ и толщиной закаленного слоя 2,5–3 мм. Это даёт возможность значительного увеличения ресурса эксплуатации рельсов за счет снижения интенсивности изнашивания боковой поверхности рельса в 2–3 раза.

3. Данное оборудование можно рекомендовать для проведения дальнейшего опытно-промышленного плазменного поверхностного упрочнения боковой поверхности рельса в условиях ВСЖД.

Список литературы

1. Балановский, А. Е. Система колесо-рельс [Текст]: в 3 ч. / А. Е. Балановский. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011. – Ч. 1. – 101 с.
2. Балановский, А. Е. Поверхностное упрочнение рельсов [Текст] / А. Е. Балановский // Путь и путевое хозяйство. – 2005. – № 11. – С. 38–40.
3. Балановский, А. Е. Оценка возможности применения поверхностного упрочнения рельсов для уменьшения бокового износа [Текст] / А. Е. Балановский // Технология ремонта восстановления, упрочнения деталей машин...: 7 Междунар. научн.практ. конф. (С.Петербург, 12-15 апр. 2005 г.). – СПб., 2005. – С. 391–400.
4. Гречнева, М. В. Снижение бокового износа железнодорожных рельсов при помощи плазменного поверхностного упрочнения [Текст] / Гречнева, С. И. Медведев, А. Е. Неживляк // Вестник Иркутского Государственного Технического Университета. – 2010. – N 6. – С. 29–34.

Медведев Сергей И. – аспирант, младший научный сотрудник Сибирского Отделения ОАО «ВНИИЖТ»

Гречнева Мария Васильевна – к.т.н., профессор
Балановский Андрей Евгеньевич – д.т.н., доцент

ФБГОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет» (ИрГТУ),
г. Иркутск, Россия