

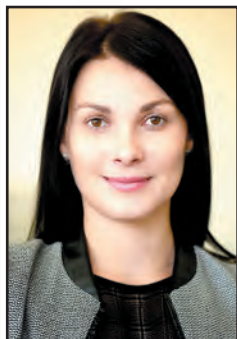


НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.143.629.4.015:672

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-2-4>

Механизм образования и исследование свойств белого слоя в высокоуглеродистой рельсовой стали М76



Екатерина ГРИДАСОВА



Зульфия ФАЗИЛОВА



Павел НИКИФОРОВ



Денис КОСЬЯНОВ

Екатерина Александровна Гридасова ¹, Зульфия Тельмановна Фазилова ²,
Павел Александрович Никифоров ³, Денис Юрьевич Косьянов ⁴

^{1,3,4} Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ), Владивосток, Россия.

² Российский университет транспорта, Москва, Россия.

✉ ² fazil_1905@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Высокочастотные вибрации, возникающие в результате многих факторов при действующих нагрузках в системе «колесо–рельс», оказывают огромное влияние на структуру и свойства рельсовой стали – возникают значительные контактные напряжения в поверхностном слое, влияющие на прочностные характеристики и общую усталость конструкции железнодорожного пути. Результатом такого воздействия, в частности, является образование так называемого «белого слоя» (White Layer, WL) – упрочнённого слоя на поверхности основного материала, устойчивого к химическому травлению и имеющего высокую твёрдость (выше 1000 HV) и хрупкость.

Целью настоящего исследования явилось изучение особенностей механизма формирования, а также свойства образующегося на поверхности металла белого слоя с применением комплексного подхода, а именно: разрушающих методов контроля, методов электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, металлографических методов и методов микротвёрдости.

Достоверность экспериментальных исследований обусловлена использованием стандартизированных методов испытаний, разработанными методами разрушающих и неразрушающих испытаний по основным направлениям, наличием аккредитованной и аттестованной лаборатории, что дало возможность в полном объёме и соответствующем качестве достичь поставленных задач.

По результатам исследований представлен анализ белого слоя, формирование которого имело место в высокоуглеродистой рельсовой стали М76 после циклических испытаний с частотой 20 кГц. Детально изучена морфология, фазовый состав и микротвёрдость данных включений в сравнении с базовым металлом. Показано, что белый слой представляет собой высокодисперсные, перлитоподобные, безликие включения феррито-цементитной структуры, причём их микротвёрдость в 3–4 раза выше исходной стали и составляет 1000–1200 HV. Предложен возможный механизм формирования белого слоя: дробление феррита и цементита, входящих в состав перлита, без промежуточных фазовых превращений.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, высокоуглеродистая сталь, высокочастотная вибрация, циклические испытания, белый слой, микроструктура, микротвёрдость, дифрактограмма, перлитоподобная структура, рельсы.

Для цитирования: Гридасова Е. А., Фазилова З. Т., Никифоров П. А., Косьянов Д. Ю. Механизм образования и исследование свойств белого слоя в высокоуглеродистой рельсовой стали М76 // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 2 (99). С. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-2-4>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В сегодняшнем мире железные дороги стали одной из наиболее развитых и быстро развивающихся отраслей транспорта. Причинами являются: относительно низкое загрязнение воздуха в расчёте на одного пассажира по сравнению с автомобилями и высокие скорости, достигаемые самыми современными поездами. Скорости движения железнодорожного транспорта непрерывно увеличиваются. Если сравнительно недавно 300–350 км/ч считались высокой скоростью, то сейчас высокоскоростные поезда развивают за рубежом скорость до 600 км/ч, а на российских железных дорогах – уровня 400 км/ч. К сожалению, увеличение скорости современных поездов влечёт за собой увеличение уровня связанных шумов и вибраций, которые являются значительными даже для обычных железных дорог [1–6] и достигают уровня ультразвука [7]. Основным источником высокочастотных вибраций вагонов являются удары колёс на стыках и неровностях рельсов (таких как шероховатость, волнистость и т.д.), которые, в свою очередь, имеют разную природу возникновения. При этом уровни и частотный спектр вибраций могут достигать ультразвуковых частот и лежат в диапазоне 10–50 кГц.

Природа влияния высокочастотных вибраций на структуру и свойства рельсовой стали является актуальной темой изучения для многих научных коллективов мира [8–12]. Было выявлено, что сам процесс разрушения и механические характеристики объектов, подверженных высокочастотным вибрациям, отличаются от стандартных условий.

Согласно [13], аварийные сходы с рельсов высокоскоростных поездов в Германии и Англии были связаны с накоплением в колесе 10^9 циклов нагружения из-за неровной поверхности рельса (наличия шероховатости). Проведённые предварительные исследования показали, что высокочастотные вибрации при действующих нагрузках в системе «колесо–рельс» оказывают огромное влияние на структуру и свойства рельсовой стали – возникают значительные контактные напряжения в поверхностном слое, влияющие на прочностные характеристики и общую усталость конструкций. Результатом такого воздействия, в частности, является образование так называемого белого слоя (White Layer, WL) – упрочнённого слоя на поверхности

основного материала, устойчивого к химическому травлению и имеющего высокую твёрдость (выше 1000 HV) и хрупкость [14–19].

Белый слой рассматривается как нанокристаллический мартенсит [14]. Спорными являются вопросы о том, образуется ли этот мартенсит в результате превращения сильно деформированного, но всё ещё имеющего кристаллическую структуру аустенита, или он – результат кристаллизации полностью выжженного в структурном отношении (аморфного) материала. В работах [15–17] утверждается, что образованию WL предшествуют механическая обработка, термообработка и другие операции, выполняемые во время изготовления деталей из углеродистых, легированных закаливаемых сталей, высокопрочных чугунов и других сплавов. Его структура состоит из тонкоиглочатого мартенсита, остаточного аустенита и содержит иногда небольшие количества мелкодисперсных карбидов, а износостойкость белого слоя возрастает с увеличением содержания углерода в нём.

По мнению авторов [18–19], наиболее часто источником формирования WL является механическая обработка. Когда температура вблизи обрабатываемой поверхности превышает температуру α – γ перехода, мартенсит, полученный в процессе трения, может формировать WL, наблюдаемый в микроструктуре. В работе [18] приведены значения твёрдости WL, которые составляют $12,85 \pm 0,80$ ГПа, что значительно больше, чем у неотпущенного мартенсита, полученного в результате различных режимов термообработки. Показано, что размер зерна в WL находится в субмикронном диапазоне с типичными значениями от 30 до 500 нм. Эти две характеристики WL отличают его от различных структур, формируемых в сталях термической обработкой.

Авторами работы [20] WL был обнаружен на поверхности железнодорожных рельсов. Объектом исследования являлись образцы рельсов высокоскоростной железной дороги, изготовленные из сталей S54 (0,6–0,8 % C, 0,8–1,3 % Mn) и UIC60 (0,55–0,75 % C, 1,3–1,7 % Mn) методом горячей прокатки с последующим охлаждением на воздухе. Нагрузка на первый рельс за время его эксплуатации составила $3,8 \cdot 10^6$ тонн, на второй $360 \cdot 10^6$ тонн. Выявлено, что повышение твёрдости в поверхностном слое до 10–12 ГПа обусловлено



наличием ультрамелкозернистой структуры, а также действием твёрдорастворного и дисперсного механизмов упрочнения. В обоих случаях формируется слоистая структура – WL с ультрамелкозернистой структурой феррита со средним размером зёрен 200 нм и цементита с высоко- и малоугловыми разориентировками, а также присутствует деформированный перлит. В WL происходит изменение морфологии цементита – пластины карбида дробятся на мелкие частицы и имеет место частичное растворение Fe_3C .

В работе [21] объектом исследования была выбрана высокоуглеродистая сталь промышленного назначения (1,0 % C). WL образовался в результате проведения испытаний на удар стальными падающими шариками за счёт сильной пластической деформации и рассеивания большого количества тепловой энергии во время удара. То есть, сильная пластическая деформация вызвала значительное повышение температуры, что привело к фазовому превращению остаточного аустенита в мартенсит, с одной стороны, и образованию новых зёрен аустенита при нагреве мартенситной структуры в поле аустенитной фазы, с другой. В микроструктуре хорошо различима структура высокодисперсного мартенсита с признаками интенсивной деформации на микроуровне. Внутри WL были отмечены наноразмерные равноосные зёрна. На деформированных участках наблюдается переход от пластически деформированных зёрен к рекристаллизованной структуре, характеризующейся округлыми высокодисперсными зёрнами.

Целью настоящего исследования является изучение особенностей механизма(ов) формирования и свойства белого слоя рельсовой стали в результате высокочастотных вибраций.

МЕТОДЫ

Исследование осуществлялось на основе комплексного подхода, а именно: разрушающих методов контроля, методов электронной микроскопии, рентгенофазового анализа, металлографических методов и методов микротвёрдости.

В частности, для достижения поставленной цели исследования использовались:

- метод ускоренных высокочастотных испытаний, который, с одной стороны, имитирует реальные условия эксплуатации:

имитацию высокочастотных вибраций, возникающих в системе колесо–рельс при движении железнодорожного состава, и, с другой стороны, даёт возможность в десять раз быстрее стандартных методов получить характеристики долговечности исследуемых материалов. Оригинальность предлагаемого метода заключается в том, что нет общепринятого метода высокочастотных испытаний, что делает его уникальным;

- метод комплексного структурного анализа основан на электронной микроскопии, фазовом анализе, металлографических и механических исследованиях, которые позволяют в полной мере оценить структурное состояние материала, идентифицировать места возможного разрушения, выявить очаги разрушения и его причины. Оригинальность предлагаемого метода заключается в комплексной оценке структуры и выявлении факторов, предшествующих разрушению, что даёт возможность проводить исследования на разных стадиях эксплуатации элементов верхнего строения пути.

Данные исследования проводятся на базе испытательной лаборатории, аккредитованной и аттестованной в системах Ростехнадзора, Росаккредитации и Российского морского регистра судоходства, что обеспечивает качество выполняемых работ.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В качестве объектов исследования выбраны образцы, изготовленные из рельсовой стали М76. Первый объект: рельс № 1 – тип Р65, термоупрочнённой категории Т1. Переложен с прямого участка главного хода участка Баковка–Одинцовка (Московская ДИ) на приёмно-отправочный путь. Нарботка по тоннажу – 600 млн т. брутто. Второй объект: рельс № 2 – тип Р65, термоупрочнение ДТ350, наработка по тоннажу – 400 млн т. брутто. Снят со второго главного пути участка Долгопрудный–Лобня (Московская ДИ). Химический состав образцов рельсовой стали М76 представлен в табл. 1.

Испытания на усталость проводились с помощью ультразвуковой установки Shimadzu USF-2000 с частотой 20 кГц. Для проведения испытаний на усталость рельсовой стали на токарном станке были изготовлены образцы с рабочей частью в виде песочных часов в соответствии с чертежом, представленным на рис. 1а.

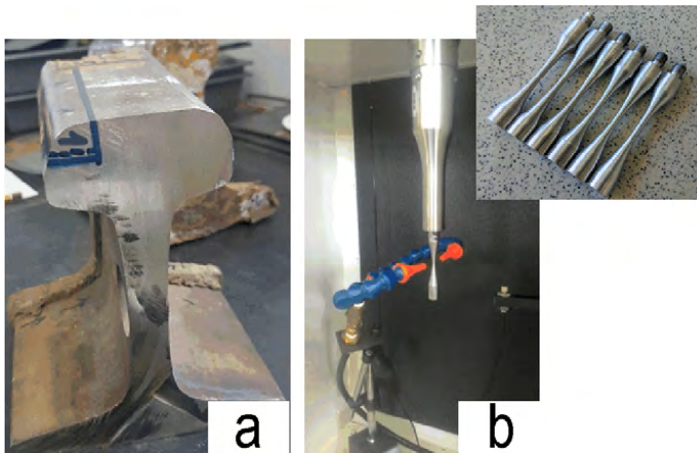


Рис. 1. Внешний вид рельса с выделенной рабочей частью для высокочастотных испытаний (а), процесс высокочастотного испытания (б) (вставка – вид образца для испытаний) [фотографии выполнены авторами].

Таблица 1

Химический состав стружки рельсовой стали М76 [данные получены авторами]

	Элементное содержание, вес. %										
	Fe	C	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	P	S	Si	V
Рельс № 1	Основа	0,745	0,016	0,076	0,125	0,83	0,075	0,013	0,011	0,31	0,04
Рельс № 2	Основа	0,77	0,015	0,053	0,10	0,93	0,039	0,015	0,035	0,21	–

В результате экспериментального высокочастотного нагружения в образцах был обнаружен «белый слой». Травление образцов для металлографии (микрошлифа) проводилось погружением на 4–5 минут в смесь растворов 2 % салициловой кислоты и 70 % этилового спирта.

Микроструктуры образцов анализировали с помощью инвертированного металлургического микроскопа Eclipse MA200 (Nikon, Япония) и сканирующего электронного микроскопа Ultra Plus (Carl Zeiss, Германия). Состав фазы был исследован дифракцией рентгена (XRD), с использованием дифрактометра Bruker D8 Advance ($\text{CuK}\alpha$, $2^\circ < 2\theta < 90^\circ$), с применением базы данных ICDD PDF2–2004 и программного обеспечения CPMR [22]. Механические характеристики образцов изучали на автоматическом микротвердомере-испытателе HNV-G-FA-D (Shimadzu, Япония).

Достоверность экспериментальных исследований обусловлена таким образом использованием стандартизированных методов испытаний, разработанными методами разрушающих и неразрушающих испытаний по основным направлениям, наличием аккредитованной и аттестованной лабораторий, что дало возможность в полном объеме и соответствующем качестве достичь поставленных задач.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Особенности состава и микроструктуры белого слоя в высокоуглеродистой стали

По результатам проведенных исследований видно, что в обоих случаях усталостная долговечность при высокочастотном нагружении имеет постоянную тенденцию к снижению. Значения усталостных характеристик исследуемых образцов стали М76 находятся в одном диапазоне и имеют одинаковый характер изменения. Усталостная долговечность в области VHCF для обоих исследуемых материалов одинакова (около 700 МПа).

Несмотря на довольно специфическое воздействие высокочастотных вибраций, усталостные явления, возникающие в процессе их воздействия, при достаточно большой величине и длительности нагрузок такие же, как при низкочастотном (стандартном) нагружении. Однако определяемые при высоких (ультразвуковых) частотах нагружения характеристики усталостной прочности, скорости протекания процесса разрушения и сам процесс разрушения различаются.

На рис. 3, 4 представлены результаты исследования микроструктуры образцов «рельс № 1» и «рельс № 2» с WL, образованным в результате высокочастотного нагружения: образец «рельс № 1» (амплитуда $\sigma_a = 790$ МПа, количество циклов $N = 1,19 \cdot 10^4$, причина



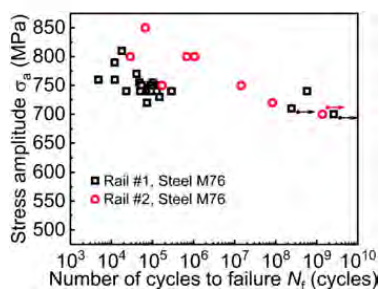


Рис. 2. Экспериментальные данные высокочастотного нагружения образцов «рельс № 1» и «рельс № 2». Стрелками обозначены образцы, которые не разрушились при данной амплитуде [получены авторами].

разрушения – трещина, на поверхности присутствуют цвета побежалости); образец «рельс № 2» ($\sigma_a = 840$ МПа, $N = 1,21 \cdot 10^4$, причина разрушения – выход из резонанса, на поверхности присутствуют цвета побежалости).

Микротвёрдость (рис. 5) для образца «рельс № 1» (рис. 3) измерялась в центре WL от начала трещины (зона 2) с нагрузкой 0,025 кгс (245,2 мН) и шагом 100 мкм. Далее измерения с шагом 100 мкм проводились в сторону области 1 на протяжении 1000 мкм. При проведении металлографических исследований была выявлена зона, отличная от WL и основного металла, – зона 3. В зоне 3 на-

блюдается промежуточное значение микротвёрдости по сравнению с зонами 2 и 1. Данные отражены на рис. 5.

Микротвёрдость «рельс № 2» (рис. 5) для образца (рис. 4) измерялась с края WL в зоне 2 (так как её протяжённость составила около 2000 мкм) с шагом 100 мкм в сторону зоны 1 с нагрузкой HV0.1 (980,7 мН) на протяжении 1000 мкм.

По проведённым исследованиям видно, что микротвёрдость WL очень высока: она находится на уровне HV 1000–1200, что примерно соответствует HRC 66 (рис. 5). Очевидно, что столь высокая твёрдость обусловлена высокой плотностью дефектов в белом слое. Повышение микротвёрдости имеет очень чёткую локализацию, при удалении от WL всего на 100 мкм для образца «рельс № 2» микротвёрдость снижается в 3–4 раза и в остальной части образца находится в пределах HV 250–400. Это соответствует перлитоподобным структурам (перлит-сорбит-троостит), характерным для структуры рельса. Стоит отметить, что в зоне 3, схожей с WL (образец «рельс № 1», рис. 3), микротвёрдость составила 484–631 HV. Вероятно, в данной области произошло частичное дробление кристаллов феррита и цементита, входящих

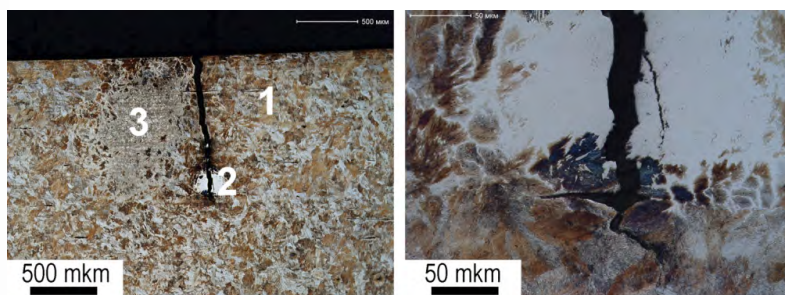


Рис. 3. Металлографические снимки характерных зон 1–3 в образце «рельс № 1», а также внешний вид трещины в БС при увеличении $\times 500$ [выполнены авторами].

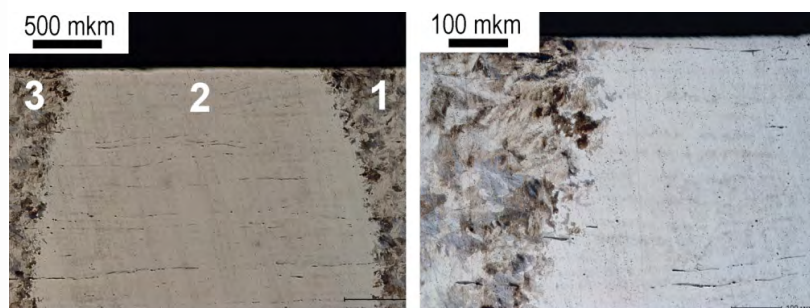


Рис. 4. Металлографические снимки характерных зон 1–3 в образце «рельс № 2», а также внешний вид шейки образца при увеличении $\times 200$ [выполнены авторами].

в состав перлита. То есть, эту структуру можно рассматривать как промежуточное звено между исходной структурой и WL. Таким образом, резкое локальное повышение микротвёрдости сигнализирует о начале процессов разрушения, но низкие средние значения микротвёрдости образца не являются признаком отсутствия в нём очагов разрушения.

Механизм формирования белого слоя в высокоуглеродистой стали при высокочастотных вибрациях

Для уточнения механизма изменения структуры в образце и образования WL с помощью электронного микроскопа (рис. 6, 7) с увеличениями от 5000× до 50000× были сняты области 1, 2 и 3 исследуемых образцов «рельс № 1» и «рельс № 2».

Для уточнения механизма разрушения и образования WL дополнительно был проведён РФА анализ зон 1, 2 и 3 (рис. 8) для образцов сталей «рельс № 1» (рис. 8а) и «рельс № 2» (рис. 8б).

Образец стали «рельс № 1» в целом имеет перлитную структуру (структурно свободно-

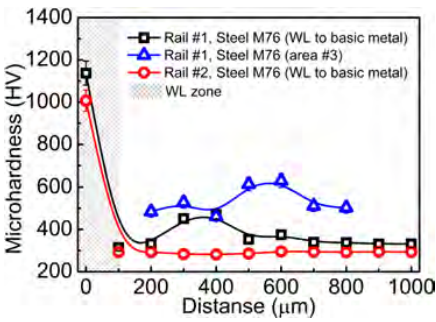


Рис. 5. Профиль микротвёрдости образцов «рельс № 1» и «рельс № 2» стали M76 от WL к основному металлу (рис. 3, 4) [выполнено авторами].

го феррита не видно) (рис. 8а). Микроструктура образца имеет следующие особенности:

1. В образце есть неметаллические включения. Возможно, эти включения являются стеклообразными шлаками. Одно из таких включений находится на нижней границе WL (вершина трещины проходит сквозь него). Образование WL именно в этом месте может быть связано с данным включением; наблюдаются участки с признаками дробления перлита и начала его гомогенизации. В случае развития этих процес-

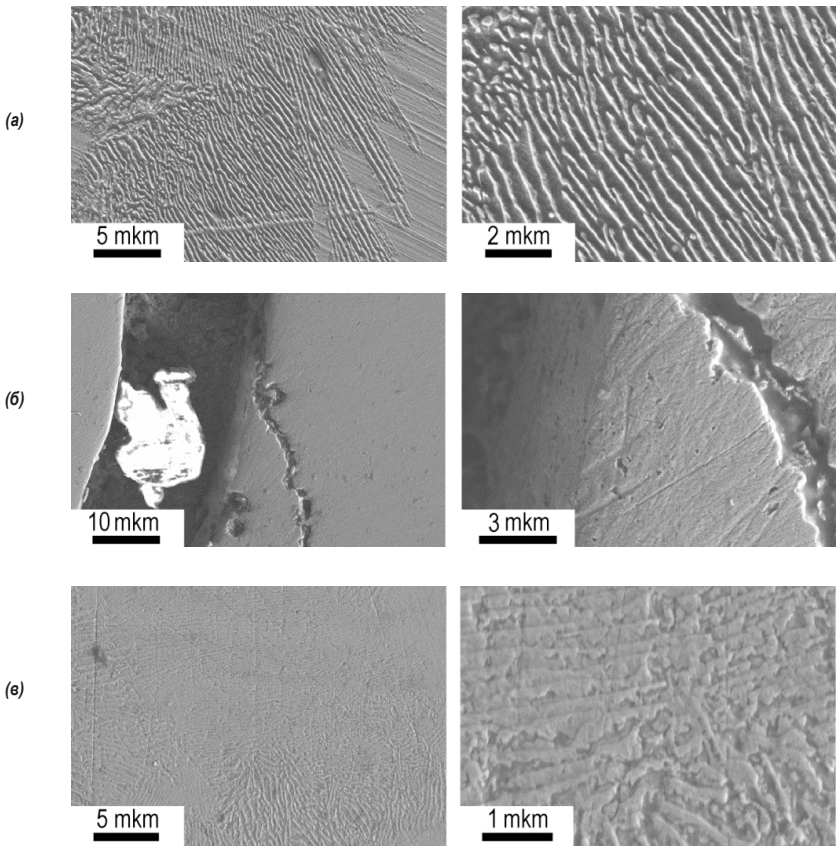


Рис. 6. СЭМ-снимки областей 1 (а), 2 (б), и 3 (в) образца Рельс № 1 [выполнены авторами].



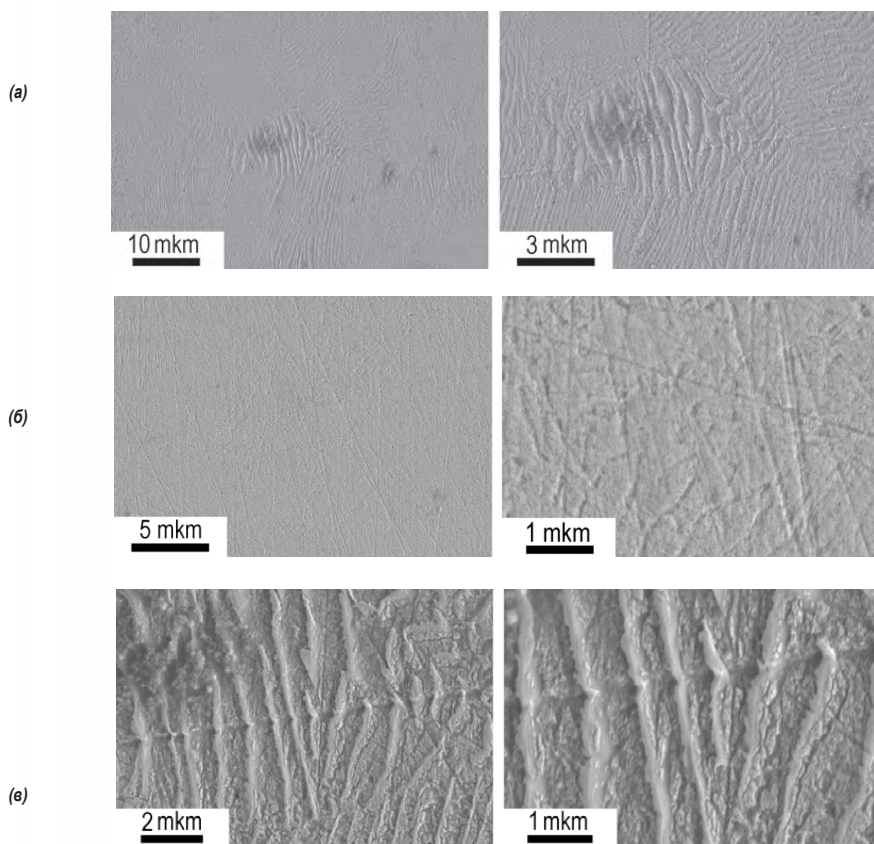


Рис. 7. СЭМ-снимки областей 1 (а), 2 (б), и 3 (в) образца Рельс № 2 [выполнены авторами].

сов данные участки также могут превратиться в WL и стать очагом разрушения; наблюдается пик в районе $2\theta \sim 38,5^\circ$ (межплоскостное расстояние $d \sim 0,234$ нм), наиболее ярко выраженный на дифрактограмме (рис. 8а) и предположительно соответствующий неметаллическому включению в образце «рельс № 1».

2. По мере удаления от излома в образце «рельс № 1» WL становится несплошным, чередуется с неизменёнными перлитными колониями (затем структура полностью переходит в неизменённый феррит).

3. В результате электронной микроскопии и измерения микротвёрдости можно утверждать, что зона 3 схожа с WL. В ней произошло частичное дробление кристаллов феррита и цементита, входящих в состав перлита, эту структуру можно рассматривать как промежуточное звено между исходной структурой и WL.

4. На дифрактограммах образца стали «рельс № 1», снятого в трёх точках, отчётливо наблюдаются пики (110), (200), (211) феррита (наиболее интенсивные пики цементита (103), (022), (210) накладываются на пик (110) фер-

рита, а пик (121) цементита – на пик (111) аустенита). В тех позициях, где должны находиться пики аустенита (111), (200), (220), (311) и мартенсита, дифрактограммы остаются на уровне фона. Дифрактограмма мартенсита отличается от дифрактограммы феррита тем, что вместо одиночных линий (110), (200), (211) и (220) феррита решётка мартенсита даёт двойные линии, линия (310) становится даже тройной. Чем больше углерода в мартенсита (то есть, чем сильнее период c отличается от a), тем шире раздвигаются линии каждой такой пары¹. Однако уширение или расщепление пиков, отнесённых к ферриту, не наблюдается (рис. 8а). Таким образом, основными фазами в образце являются феррит и цементит. Аустенит и мартенсит либо отсутствуют, либо их количества не превышают 5 вес. %.

5. Наблюдается значительное гало (повышение относительно общего уровня дифрак-

¹ Миркин Л. И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов: Справочник. – М.: Изд-во МГУ, 1976. – 140 с.; Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. – М.: Физматгиз, 1961. – 863 с.

тограммы без чёткой локализации) в районе $2\theta \sim 7...23^\circ$, которое может говорить о частичной аморфизации или, как минимум, высокой плотности дефектов в данной области (рис. 8а).

6. Отдельно стоит рассмотреть наличие пика при $2\theta \sim 38,5^\circ$ (рис. 8а). Известно, что смещать пики в металлах могут напряжения. Поскольку для пиков феррита смещение не имеет места, то и макронапряжений нет. Одновременно ширина пика при $2\theta \sim 38,5^\circ$ неизвестной фазы примерно такая же, как и у феррита, что также говорит об отсутствии микронапряжений у неизвестной фазы. Объясняется это тем, что ориентированные микронапряжения могут вызывать смещение пиков, но при этом все микронапряжения вызывают уширение пиков. С другой стороны, согласно анализу базе данных ICDD PDF2-2004, наличие данного пика соответствует 76 различным соединениям. Поэтому идентификация пика при $2\theta \sim 38,5^\circ$ затруднительна.

Образец стали «рельс № 2» имеет следующие особенности:

1. Микротрещины в данном образце обнаружены не были; в шейке образца по всему сечению обнаружен WL общей шириной до 2000 мкм.

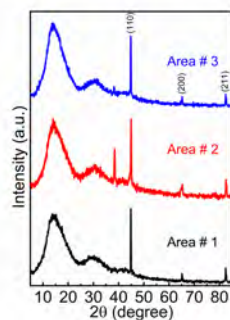
2. Микроструктура зон 1 и 3 сохраняет характерную для перлита морфологию.

3. Основными фазами в образце «рельс № 2», как и в образце M76, являются феррит и цементит, также наблюдается значительное гало в районе $2\theta \sim 10...23$ (рис. 8б).

ВЫВОДЫ

Рассмотрены особенности микроструктуры и фазового состава белого слоя в экспериментальных образцах высокоуглеродистой рельсовой стали M76, сформированного после циклических испытаний с частотой 20 кГц. Согласно данным РФА, основные фазы, составляющие белый слой, – феррит и цементит. Аустенит и мартенсит либо отсутствуют, либо их количества не превышают 5 вес.%. Микротвёрдость белого слоя значительно (в несколько раз) выше микротвёрдости исходной стали и составляет 1000–1200 НВ. Таким образом, сформированный белый слой представляет собой высокодисперсную, перлитоподобную, безликую структуру. В области, схожей с WL (образец «рельс № 1», рис. 3), микротвёрдость составила 484–631 НВ.

(а)



(б)

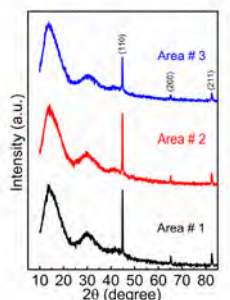


Рис. 8. Дифрактограммы зон 1, 2 и 3 для образцов сталей «рельс № 1» (а) и «рельс № 2» (б) [выполнены авторами].

В данной области произошло частичное дробление кристаллов феррита и цементита, входящих в состав перлита, их рельеф после травления выражен гораздо слабее (рис. 8в), чем у исходного перлита (рис. 8а). Эту структуру можно рассматривать как промежуточное звено между исходной структурой и WL. По проведённому комплексному исследованию возможным является следующий механизм формирования белого слоя: дробление феррита и цементита, входящих в состав перлита, без промежуточных фазовых превращений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mori, S., Kobayashi, M., Osawa, J. Noise Reduction Measure for Trussed Non-slab Bridges. In: Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 2018, Vol. 139, pp. 343–354. Springer, Cham. Ed. by D. Anderson, P.-E. Gautier, M. Iida [et al]. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73411-8_25.
2. Heckl, M., Hauck, G., Wetschurack, R. Structure-borne sound and vibration from rail traffic. Journal of Sound and Vibration, 1996, Vol. 193, Iss. 1, pp. 175–184. DOI: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0257>.
3. Němec, M., Gergeľ, T., Gejdoš, M., Danihelová, A., Ondrejka, V. Selected Approaches to the Assessment of Environmental Noise from Railways in Urban Areas. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, Vol. 18 (13), art. 7086. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18137086>.



4. Kouroussis, G., Verlinden, O., Conti, C. Influence of some vehicle and track parameters on the environmental vibrations induced by railway traffic. *Vehicle System Dynamics*, 2012, Vol. 50 (4), pp. 619–639. DOI: <https://doi.org/10.1080/00423114.2011.610897>.
5. Kouroussis, G., Conti, C., Verlinden, O. Investigating the influence of soil properties on railway traffic vibration using a numerical model. *Vehicle System Dynamics*, 2013, Vol. 51 (3), pp. 421–442. DOI: [10.1080/00423114.2012.734627](https://doi.org/10.1080/00423114.2012.734627).
6. Thompson, D. Railway noise and vibration. Mechanisms, modelling and means of control. Elsevier Science, 2008, 536 p. eBook ISBN 9780080914435, Hardcover ISBN 9780080451473.
7. Lyu, Y., Björklund, S., Bergseth, E., Olofsson, U., Nilsson, R. Development of a noise related track maintenance tool. The 22nd International Congress on Sound and Vibration, ICSV22, Florence (Italy), 12–16 July 2015. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Yezhe-Lyu/publication/283354865_DEVELOPMENT_OF_A_NOISE_RELATED_TRACK_MAINTENANCE_TOOL/links/56373d6608ae88cf81bd5187/DEVELOPMENT-OF-A-NOISE-RELATED-TRACK-MAINTENANCE-TOOL.pdf. Доступ 22.04.2022.
8. Nonaka, I., Setowaki, S., Ichikawa, Y. Effect of frequency on high cycle fatigue strength of railway axle steel. In: Proceedings of the fifth international conference on very high cycle fatigue, VHCF-5, 2011, pp. 153–158. DOI: [10.1016/J.IJFATIGUE.2013.08.020](https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2013.08.020).
9. Ze Fu Luo, Shi Ming Cui, Yan Zeng Wu, Qing Yuan Wang. Super Long Life Fatigue Properties of Rail Steel U71Mn and U75V. *Advanced Materials Research*, 2013, Vols. 690–693, pp. 1753–1756. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.1753](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.690-693.1753).
10. Liu, X., Sun, C., Hong, Y. Crack initiation characteristics and fatigue property of a high-strength steel in VHCF regime under different stress ratios. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2016, Vol. 35, pp. 88–97. [Электронный ресурс]: <https://www.gruppofrattura.it/pdf/fig/numero35/98/>. Доступ 22.04.2022.
11. Pfafinnger, M. R. Higher Vibration Modes in Railway Tracks at their Cutoff Frequencies. Diss. ETH No. 13755. A thesis submitted to Swiss Federal Institute of Technology for the degree of Doctor of Technical Science, Zürich, 2000. [Электронный ресурс]: <https://www.yumpu.com/en/document/view/3740866/higher-vibration-modes-in-railway-tracks-at-their-cutoff-frequencies>. Доступ 22.04.2022.
12. Kaewunruen, S., Remennikov, A. M., Aikawa, A., Sakai, H. Free vibrations of interspersed railway track systems in three-dimensional space. *Acoustics Australia*, 2014, Vol. 42 (1), pp. 20–26. [Электронный ресурс]: <https://ro.uow.edu.au/eisrpapers/2237/>. Доступ 22.04.2022.
13. Miller, K. J., O'Donnell, W. J. The fatigue limit and its elimination. *Fatigue Fracture of Engineering Materials and Structure*, 1999, Vol. 22, Iss. 7, pp. 545–557. DOI: [10.1046/J.1460-2695.1999.00204.X](https://doi.org/10.1046/J.1460-2695.1999.00204.X).
14. Krawczyk, J., Pacyna, J. Effect of tool microstructure on the white layer formation. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2006, Vol. 17, Iss. 1–2, pp. 93–96. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/Jerzy-Pacyna/publication/42107389_Effect_of_tool_microstructure_on_the_white_layer_formation/links/0912f50b385de2aa65000000/Effect-of-tool-microstructure-on-the-white-layer-formation.pdf. Доступ 22.04.2022.
15. Babei, Yu. I., Ryabov, B. F., Golubets, V. M., Dyadchenko, B. T., Kaparova, L. A. Nature of etch-resistant layers produced in steel as a result of machining and certain other operations. *Soviet materials science: a transl. of Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, 1975, Vol. 9, pp. 394–400. Translated from *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, 1973, Vol. 9, No. 4, pp. 33–39. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00715630> [доступ платный].
16. Golubets, V. M. Wear Resistance of the White Layer in Relation to the Carbon Content of Steels. *Soviet materials science: a transl. of Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, 1975, Vol. 9, pp. 101–102. Translated from *Fiziko-Khimicheskaya Mekahnika Materialov*, 1973, Vol. 9, No. 1, pp. 105–106. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00717634> [доступ платный].
17. Griffiths, B. Mechanisms of White Layers Generation with Reference to Machining and Deformation Processes. *ASME Journal of Tribology*, 1987, Vol. 109, No. 3, pp. 525–530. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3261495> [доступ платный].
18. Ekinovic, S., Begović, E., Plančić, I., Anzel, I., Rimac, M. Scanning electron microscopy in analysis of influence of the alloying elements in steel on white layer formation by hard turning. *Journal of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*, 2015, Vol. 19, No. 1, pp. 37–40. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/profile/E-begovic/publication/281616455_scanning_electron_microscopy_in_analysis_of_influence_of_the_alloying_elements_in_steel_on_white_layer_formation_by_hard_turning/links/55eff25308aef559dc44f1d3/scanning-electron-microscopy-in-analysis-of-influence-of-the-alloying-elements-in-steel-on-white-layer-formation-by-hard-turning.pdf. Доступ 22.04.2022.
19. Васильев С. Г., Попцов В. В. Повышение твердости поверхности детали термическим воздействием методом деформирующего резания // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2011. – № 12. – С. 37–43. DOI: [10.18698/0536-1044-2011-12-37-43](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2011-12-37-43).
20. Иванисенко Ю. В., Бауманн Г., Фехт К. и др. Наноструктура и твердость белого слоя на поверхности железнодорожных рельсов // *Физика металлов и металловедение*. – 1997. – № 3. – Т. 83. – С. 104–111.
21. Hossain, R., Pahlevani, F., Witteveen, E., Banerjee, A. [et al]. Hybrid structure of white layer in high carbon steel – Formation mechanism and its properties. *Scientific reports*, 2017, Vol. 7, article 13288. DOI: [10.1038/s41598-017-13749-7](https://doi.org/10.1038/s41598-017-13749-7).
22. Toby, B. H. CMPR – A powder diffraction toolkit. *Journal of Applied Crystallography*, 2005, Vol. 38, pp. 1040–1041. DOI: [10.1107/S0021889805030232](https://doi.org/10.1107/S0021889805030232). ●

Информация об авторах:

Гридасова Екатерина Александровна – кандидат технических наук, доцент Департамента промышленной безопасности Политехнического института ДВФУ, Владивосток, Россия, olvin@list.ru.

Фазилова Зульфия Тельмановна – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортного строительства Российской университета транспорта, Москва, Россия, fazil_1905@mail.ru.

Никифоров Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент Департамента промышленной безопасности Политехнического института ДВФУ, Владивосток, Россия, nikiforova@gmail.com.

Косьянов Денис Юрьевич – кандидат технических наук, доцент Департамента промышленной безопасности Политехнического института ДВФУ, Владивосток, Россия, kosianov.diu@dvfu.ru.

Статья поступила в редакцию 22.04.2022, одобрена после рецензирования 30.04.2022, принята к публикации 11.05.2022.