

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 539.27:669.14.018.294.2

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.005

РОЛЬ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРОЧНЕНИИ РЕЛЬСОВ ИЗ ЗАЭВТЕКТОИДНОЙ СТАЛИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Наталья Анатольевна Попова¹, Татьяна Семеновна Куницына²,
Елена Леонидовна Никоненко³, Виктор Евгеньевич Громов⁴,
Михаил Анатольевич Порфирьев⁵, Олег Владимирович Шугаев⁶

^{1,2,3} Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

^{4,5,6} Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Кемеровская обл., Россия

¹natalya-porova-44@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8823-4562>

²kma11061990@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6801-4909>

³vilatovsk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0396-9541>

⁴gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>,

⁵mporf372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739>,

⁶o_shugaev@mail.ru

Аннотация. Методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии исследована структура 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ400ИК из заэвтектоидной стали Э90ХАФ после длительной эксплуатации на Забайкальской железной дороге (пропущенный тоннаж 243,7 млн. тонн). Проведена классификация морфологических составляющих структуры, отмечено, что прочность стали определяется совместным действием ряда физических механизмов, одним из которых является упрочнение внутренними напряжениями. Изучена тонкая структура и выполнен анализ уровня внутренних напряжений и определена их роль в упрочнении стали в двух участках одной головки рельса («поверхности катания» и «выкружки») на одинаковых расстояниях от поверхности контакта «колесо – рельс». Обосновано использование формул оценки внутренних дальнедействующих полей напряжений для пластического, упругого и упруго-пластического изгиба кристаллической решетки. Показано, что по мере приближения к поверхности головки структура претерпевает все большую пластическую деформацию, причем наиболее заметно по радиусу скругления выкружки. Установлено, что механизмы упрочнения на «поверхности катания» и в «выкружке» различны: на «поверхности катания» основным механизмом упрочнения является упрочнение внутренними дальнедействующими напряжениями, в «выкружке» – субструктурное упрочнение.

Ключевые слова: заэвтектоидная рельсовая сталь, поверхность катания, выкружка, внутренние напряжения, упрочнение, длительная эксплуатация, морфология структуры, скалярная и избыточная плотность дислокаций.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEMN-2026-0003) и гранта Российского научного фонда № 25-29-20020, <https://rscf.ru/project/25-29-20020/> и Кемеровской области – Кузбасса.

Для цитирования: Попова Н.А., Громов В.Е., Порфирьев М.А., Шугаев О.В., Никоненко Е.Л., Куницына Т.С. Роль дислокационной структуры и внутренних напряжений в упрочнении рельсов из заэвтектоидной стали при длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 3. С. 323-330. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.005.

Original article

THE ROLE OF INTERNAL STRESSES IN THE HARDENING OF RAILS MADE OF HYPER-EUTECTOID STEEL DURING LONG-TERM OPERATION

Natalya A. Popova¹, Tatyana S. Kunitsyna², Elena L. Nikonenko³, Viktor E. Gromov⁴, Mikhail A. Porfiryev⁵, Oleg V. Shugaev⁶^{1,2,3}Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia^{4,5,6}Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia¹natalya-popova-44@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8823-4562>²kma11061990@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6801-4909>³vilatovsk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0396-9541>⁴gromov@physics.sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>,⁵mporf372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739>,⁶o_shugaev@mail.ru

Abstract. The structure of 100-meter differentiated-tempered DT400IK rails made of E90KHAF eutectoid steel was studied using transmission electron diffraction microscopy after long-term operation on the Trans-Baikal Railway (243.7 million tons of traffic). The morphological components of the structure were classified, and it was noted that the strength of steel is determined by the combined action of several physical mechanisms, one of which is internal stress hardening. The level of internal stresses has been analyzed, and their role in strengthening the steel has been determined in two sections of the same rail head ("rolling surface" and "fillet") at equal distances from the wheel-rail contact surface. The use of formulas for estimating internal long-range stress fields for plastic, elastic, and elastic-plastic bending of the crystal lattice is substantiated. It is shown that as the structure approaches the surface of the head, it undergoes increasing plastic deformation, which is most noticeable in the radius of curvature of the fillet. It has been established that the strengthening mechanisms on the "rolling surface" and in the "fillet" are different: on the "rolling surface" the main strengthening mechanism is strengthening by internal long-range stresses, in the "fillet" it is substructural strengthening.

Keywords: hypereutectoid rail steel, rolling surface, fillet, internal stresses, hardening, long-term operation, structure morphology, scalar and excessive dislocation density.

Acknowledgements. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FEMN-2026-0003) and the Russian Science Foundation grant No. 25-29-20020, <https://rscf.ru/project/25-29-20020/> and the Kemerovo Region – Kuzbass.

For citation: Popova N.A., Gromov V.E., Porfiryev M.A., Shugaev O.V., Nikonenko E.L. & Kunitsina T.S. (2026). The role of internal stresses in the hardening of rails made of hyper-eutectoid steel during long-term operation. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(3), 323-330 (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.005.

Введение

Проблема внутренних напряжений в металлах и сплавах находится в центре внимания исследователей уже много лет. Это объясняется тем, что внутренние напряжения играют важную роль в формировании предела текучести, деформационном упрочнении [1] и, особенно, в зарождении и раскрытии микротрещин [2, 3]. В заэвтектидной рельсовой стали ключевую роль в упрочнении также играют внутренние напряжения [2, 4]. Эксплуатация рельсов приводит к деформационному упрочнению поверхности, которое включает измельчение зерна, образование дислокационных структур, а

также фазовые превращения, повышающие твердость и износостойкость головки рельса [2, 4, 5]. Напряжения и структура неразделимы: пластическая деформация создает напряжения, а фазовые превращения под их действием меняют структуру [2, 6]. Упрочненный слой с высокой твердостью и мелким зерном лучше сопротивляется абразивному и адгезионному износу.

Известно, что длительная эксплуатация рельса приводит к пластической деформации и множественным преобразованиям структуры в поверхностных слоях – появляется градиентная структура в направлении глубины материала рельса (по мере накопления деформации по-

верхностные слои рельса значительно деформируются и измельчаются вплоть до образования субзеренной структуры) [2, 6–9].

Особенно сильно это проявляется при эксплуатации рельсов на криволинейных участках железнодорожного пути, что очень характерно для Забайкальской железной дороги. Такие условия эксплуатации приводят со временем к ускорению усталости и износа материала рельса, что, в свою очередь, значительно сокращает срок службы рельса [5, 10, 11]. Было установлено, что при эксплуатации криволинейных путей нагрузка на рельсы оказывается неравномерной, что приводит к их неравномерному износу и повреждению, причем чем круче кривизна, тем больше напряжения [10–12].

Установлено, что прочность стали определяется совместным действием ряда физических механизмов, одним из которых является упрочнение внутренними напряжениями [1, 2, 7, 13]. Ранее было показано, что способность любого материала к пластической деформации обусловлена наличием легко перемещающихся под нагрузкой дислокаций в его кристаллической решетке [1, 2]. Взаимодействие дислокаций между собой приводит к накоплению скалярной плотности дислокаций и, наряду с примесями и частицами выделений, к упрочнению материала [2, 13]. Взаимодействие дислокаций между собой усиливается в случае увеличения полей внутренних напряжений [1]. Но при этом подчеркивалось, что высокий уровень внутренних напряжений может привести к охрупчиванию материала и даже образованию трещин [1, 2, 7].

Целью настоящей работы является анализ уровня внутренних полей напряжений и их роль в упрочнении рельсов при длительной эксплуатации на Забайкальской железной дороге.

Материал и метод исследования

Исследования выполнены на образцах 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ400ИК из заэвтектоидной стали марки Э90ХАФ производства АО «Евраз-ЗСМК» после длительной эксплуатации (пропущенный тоннаж 234,7 млн. тонн) на Забайкальской железной дороге, отличающейся наличием большого числа подъемов и спусков, крутых поворотов. Элементный состав исследуемой стали регламентирован ГОСТом 5185-

2013 и ТУ 24.10.75111-298-057576.2017 РЖД. Содержание основных элементов в стали % (мас.): 0.92 С; 1.0 Mn; 0.40 Si; 0.14 V; Fe – основа.

Исследования проведены в двух участках головки рельса (рис. 1). Участок 1 – вдоль центральной оси симметрии головки рельса («поверхность катания»), участок 2 – по радиусу скругления головки рельса («выкружка»). Образцы были вырезаны на расстояниях 0; 2; 10 мм от поверхности контакта «колесо – рельс». Работа выполнена методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии (ПЭМ) на тонких фольгах с использованием электронного микроскопа JEM-2100 (Jeol, Япония).

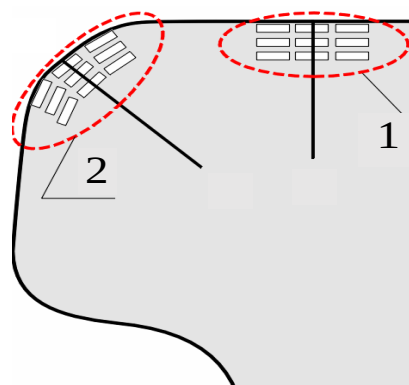


Рис. 1. Схема приготовления объектов исследования в двух участках (1 и 2) головки рельса: 1 – «поверхность катания», 2 – «выкружка»

Fig 1. Scheme of preparation of research objects in two sections (1 and 2) of the rail head: 1 – "rolling surface", 2 – "fillet"

Для каждого образца была проведена классификация морфологических составляющих структуры, в которых определен фазовый состав и рассчитаны параметры тонкой структуры такие, как: размер фрагментов и субзерен, скалярная ρ и избыточная ρ_+ плотность дислокаций, кривизна-кручение кристаллической решетки χ и амплитуды внутренних напряжений, создаваемых дислокационной структурой, σ_d (напряжения сдвига, или «леса» дислокаций), и напряжений, возникающих в тех местах материала, где присутствует избыточная плотность дислокаций, σ_d (внутренние дальнотействующие, или локальные напряжения). Все количественные параметры тонкой структуры определены согласно методик, изложенных в [13], и статистически обработаны. На основа-

нии полученных параметров выполнены оценки влияния дислокационной структуры и внутренних напряжений на упрочнение исследуемой стали.

Известно [1, 2, 7], что сформированные в результате длительной эксплуатации рельсовой стали остаточные упругие напряжения релаксируют в виде пластической деформации. Это приводит к накоплению высокой скалярной плотности дислокаций ρ и образованию избыточной плотности дислокаций $\rho_{\pm} = \rho_+ - \rho_-$ (ρ_+ – положительно и ρ_- – отрицательно заряженные дислокации). В свою очередь, скалярная плотность дислокаций приводит к возникновению в материале внутренних напряжений сдвига (или «леса» дислокаций) σ_l , а избыточная – к внутренним дальнедействующим (или локальным) напряжениям σ_d .

Известно также [1, 13], что изгиб-кручение кристаллической решетки может быть пластическим (дислокационным) или упругим. В случае дислокационного изгиба $\rho_{\pm} \leq \rho$, и амплитуда внутренних дальнедействующих напряжений определяется согласно [1, 13]:

$$\sigma_d^{nl} = m\alpha G \sqrt{b\chi}. \quad (1)$$

где m – фактор Шмида (ориентационный множитель), для рельсовой заэвтектоидной стали $m = 2,75$; $\alpha = 0,05 - 1,0$ – безразмерный коэффициент, зависящий от типа дислокационного ансамбля; G – модуль сдвига материала матрицы; b – вектор Бюргерса; χ – амплитуда кривизны-кручения (изгиба-кручения) кристаллической решетки ($\chi = \partial\varphi / \partial l$, где $\partial\varphi$ – изменение ориентировки отражающей плоскости фольги, ∂l – перемещения изгибного экстинкционного контура).

В случае упругого изгиба изгиб-кручение кристаллической решетки обусловлен нерелаксированными упругими напряжениями, а амплитуда локальных напряжений находится в прямой зависимости от амплитуды χ и определяется согласно формулы:

$$\sigma_d^{yp} = m\alpha_c G t \chi, \quad (2)$$

где α_c – коэффициент Струнина, $t = 200$ нм – толщина фольги. Возможен и упругопластический изгиб, когда в материале присутствуют оба источника полей:

$$\sigma_d = \sigma_d^{nl} + \sigma_d^{yp}. \quad (3)$$

Для дислокационных механизмов, действующих внутри отдельного зерна локально и неоднородно, какими являются σ_l и σ_d , и которые оказываются разными по амплитуде, месту действия и физическому смыслу, при определении их вклада в общее упрочнение стали должно проводиться суммирование σ_l и σ_d в квадратичном приближении, т.е. как [13]:

$$\sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_d^2}. \quad (4)$$

Известно, что когда в структуре образуются различного рода субграницы (дислокационные стенки, резкие и размытые границы дислокационных ячеек, фрагментов, субзерен), являющиеся препятствиями для движения дислокаций, необходимо учитывать также и субструктурное упрочнение σ_{cc} . Оно оценивается, исходя из соотношения [13]:

$$\sigma_{cc} = k_c D^{-1}, \quad (5)$$

где D – размер образованного фрагмента или субзерна; k_c – коэффициент, для заэвтектоидной стали $k_c = 0,15$ МПа·мм [13].

Полученные результаты и их обсуждение

Ранее проведенные авторами исследования [12] показали, что на расстоянии 10 мм от поверхности контакта «колесо – рельс» в обоих участках рельса структура стали после длительной эксплуатации представлена перлитом, различным по морфологии, а именно, пластинчатым идеальным (рис. 2а), частично разрушенным, то есть дефектным (рис. 2б) и пластинчатым фрагментированным (рис. 2в). Качественно все морфологические составляющие в обоих участках головки рельса подобны. Однако на таком же расстоянии 10 мм от поверхности контакта структура стали в «выкружке» уже претерпела пластическую деформацию [12] – в структуре присутствует четко сформированная субзеренная структура (рис. 2г), хотя и в небольшом количестве (~5 %), а доля пластинчатого перлита оказалась уменьшенной почти в 2 раза.

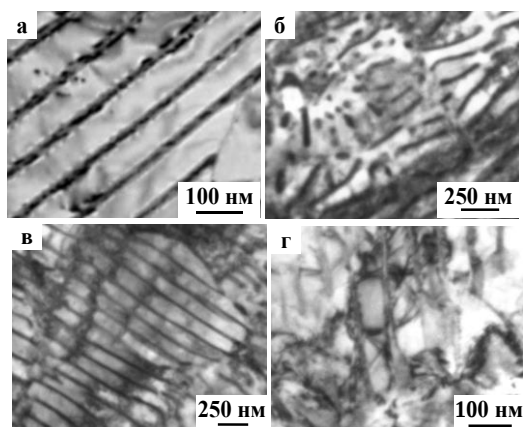


Рис. 2. Примеры ПЭМ-изображений морфологических составляющих структуры в заэвтектоидной рельсовой стали после длительной эксплуатации на Забайкальской железной дороге: а – пластинчатый перлит; б – разрушенный пластинчатый перлит; в – фрагментированный пластинчатый перлит; г – субзеренная структура

Fig. 2. Examples of TEM images of morphological components of a structure in hypereutectoid rail steel after long-term operation on the Trans-Baikal Railway: а - lamellar perlite; б - destroyed lamellar perlite; с - fragmented lamellar perlite; d - subgrain structure

Выполненные измерения скалярной ρ и избыточной $\rho_{\pm}$ плотности дислокаций показали, что в обоих участках рельса как в каждой морфологической составляющей, так и в среднем по материалу выполняются условия $\rho > \rho_{\pm}$ и $\sigma_{\text{д}} \geq \sigma_{\text{л}}$ (рис. 3а-б). При этом скалярная и избыточная плотность дислокаций, а также амплитуда внутренних напряжений сдвига и дальнедействующих напряжений во всех морфологических составляющих в «выкружке» по сравнению с «поверхностью катания» заметно выше [12].

По мере приближения к поверхности образца в обоих участках головки рельса структура изменяется, претерпевая все большую пластическую деформацию, причем наиболее заметно в материале «выкружки». А именно, происходит интенсивное разрушение перлита, совершенствование фрагментированной структуры и формирование субзеренной структуры.

Одновременно эксплуатация приводит к упругому искажению кристаллической решетки матрицы стали, однако наибольшие изменения происходят в поверхностном слое (0–2 мм), и особенно в структуре «выкружки», что хорошо согласуется с литературными данными [7].

Поведение амплитуды внутренних напряжений сдвига $\sigma_{\text{л}}$ на «поверхности катания» практически не изменяется во всем интервале 0–10 мм (рис. 3а, кр. 1), в «выкружке» – вначале слабо, затем интенсивно уменьшается (рис. 3б, кр. 1) при приближении к поверхности (0 мм).

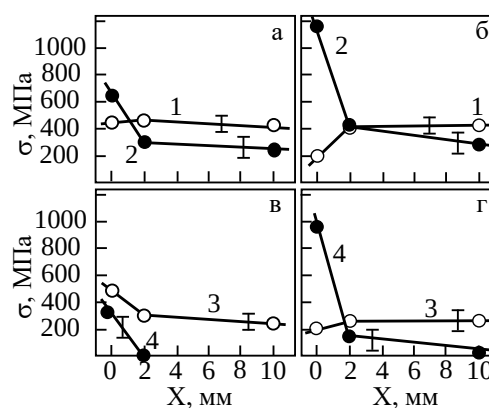


Рис. 3. Изменение амплитуды внутренних напряжений по толщине поверхностного слоя головки рельсов «поверхности катания» (а,в) и «выкружке» (б,г): 1 – амплитуда напряжения сдвига $\sigma_{\text{л}}$, 2 – амплитуда локальных напряжений $\sigma_{\text{д}}$ и её составляющих (3 – пластической $\sigma_{\text{д}}^{\text{пл}}$, 4 – упругой $\sigma_{\text{д}}^{\text{упр}}$)

Fig 3. The change in the amplitude of internal stresses along the thickness of the surface layer of the rail head of the "rolling surface" (а,с) and "fillet" (б,д): 1 – the amplitude of the shear stress $\sigma_{\text{л}}$, 2 – the amplitude of local stresses $\sigma_{\text{д}}$ and its components (3 – plastic $\sigma_{\text{д}}^{\text{pl}}$, 4 – elastic $\sigma_{\text{д}}^{\text{el}}$)

Поведение кривых $\sigma_{\text{д}}$ в обоих участках головки рельса в различно. На «поверхности катания» упругая составляющая внутренних дальнедействующих напряжений присутствовала только в слое 0–2 мм. По мере приближения к поверхности упругая составляющая интенсивно увеличивается, но остается меньше пластической, и на поверхности контакта «колесо – рельс» оказывается $\sigma_{\text{д}}^{\text{упр}} < \sigma_{\text{д}}^{\text{пл}}$ в ~1,5 раза (рис. 3в). В «выкружке» упругая составляющая $\sigma_{\text{д}}^{\text{упр}}$ появляется уже на глубине 10 мм, но только в субзеренной структуре, однако в среднем по материалу остается $\sigma_{\text{д}}^{\text{пл}} > \sigma_{\text{д}}^{\text{упр}}$ (рис. 3г). По мере приближения к поверхностному слою величина упругой составляющей увеличивается, причем наиболее интенсивно в субзеренной структуре, и начинает превалировать над пластической так, что в поверхностном слое её амплитуда в среднем по материалу в ~5 раз выше

амплитуды пластической составляющей (рис. 3г).

Хорошо известно, что внутренние напряжения (напряжения сдвига $\sigma_{\text{д}}$ и дальнотействующие напряжения $\sigma_{\text{д}}$) – это один из механизмов, влияющий на прочность стали. Кроме того, вследствие интенсивного формирования в материале субзеренной структуры, нельзя не считать и с субзеренным упрочнением. Поэтому на основе результатов, полученных ранее [12], а также данных, приведенных на рис. 3, согласно формул (1) – (5) были рассчитаны величины субзеренного упрочнения $\sigma_{\text{сз}}$ и упрочнения внутренними напряжениями $\sigma_{\text{д}}$ и $\sigma_{\text{д}}$ в обоих участках головки рельса в целом по материалу на различных расстояниях от поверхности контакта «колесо – рельс». Полученные результаты представлены на рис. 4. Из рис. 4 следует, во-первых, наибольшему изменению подвергается приповерхностный слой рельса толщиной не более 2 мм, причем наиболее заметно – в «выкружке». Во-вторых, основным механизмом упрочнения на «поверхности катания» является упрочнение внутренними дальнотействующими напряжениями $\sigma_{\text{д}}$ (рис. 4а, кр. 1), причем, как следует из рис. 3а,в, вклад пластической составляющей $\sigma_{\text{д}}^{\text{пл}}$ практически в 1,5 раза превышает вклад упругой $\sigma_{\text{д}}^{\text{упр}}$, а величина $\sigma_{\text{д}}^{\text{пл}}$ сравнима с величиной $\sigma_{\text{д}}$. В «выкружке» наоборот (рис. 3б,г) – вклад пластической составляющей $\sigma_{\text{д}}^{\text{пл}}$ практически на порядок меньше, чем вклад упругой составляющей $\sigma_{\text{д}}^{\text{упр}}$ и при этом величина $\sigma_{\text{д}}^{\text{пл}}$ сопоставима с величиной $\sigma_{\text{д}}$. Высокие значения $\sigma_{\text{д}}^{\text{упр}}$ присутствуют в основном внутри субзеренной структуры, а их вклад, в отличие от «поверхности катания», оказывается разупрочняющим (рис. 4б, кр. 1).

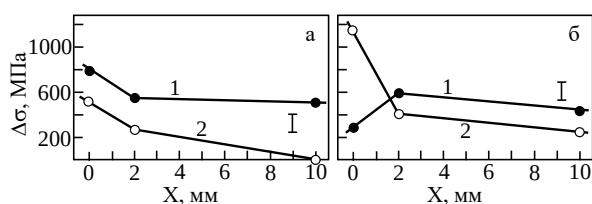


Рис. 4. Изменение величины упрочнения внутренними напряжениями (напряжениями сдвига и дальнотействующими) (1) и субструктурного (2) по толщине поверхностного слоя головки рельсов стали после длительной эксплуатации на Забайкальской железной дороге: а – «поверхность катания», б – «выкружка»

Fig 4. The change in the amount of hardening by internal stresses (shear stresses and long-range) (1) and substructural (2) in the thickness of the surface layer of the steel rail head after prolonged operation on the Trans-Baikal Railway: a - "rolling surface", b - "fillet"

Выше отмечалось, что в «выкружке» уже на расстоянии 10 мм от поверхности контакта «колесо – рельс» присутствует субзеренная структура (~5 %), объемная доля которой быстро увеличивается и на поверхности контакта составляет ~70 %. На «поверхности катания» субзеренная структура зарождается и совершенствуется лишь в приповерхностном слое 0–2 мм и на поверхности контакта составляет лишь 35 % [12]. Это обуславливает различный рост плотности субграниц (границ субзерен) в обоих участках головки рельса, приводящий к субструктурному упрочнению материала, что хорошо видно на рис. 4, кр. 2. Таким образом, из анализа рис. 4а и рис. 4б следует, что, если на «поверхности катания» основным механизмом упрочнения является упрочнение внутренними дальнотействующими напряжениями, то в «выкружке» – субструктурное упрочнение.

Заключение

Основными отличиями в обоих участках головки рельса после длительной эксплуатации на Забайкальской железной дороге являются наличие, интенсивность формирования и совершенствование субзеренной структуры. Это приводит к тому, что механизмы упрочнения на «поверхности катания» и «выкружки» различны. На «поверхности катания», где субзеренная структура зарождается только в приповерхностном слое 0 – 2 мм, основным механизмом упрочнения является упрочнение внутренними дальнотействующими напряжениями. В «выкружке» при интенсивном увеличении объемной доли субзеренной структуры до ~70 % в интервале 0–2 мм основным механизмом упрочнения является субструктурное упрочнение.

Список литературы

1. Козлов Э.В., Глезер А.М., Конева Н.А., Попова Н.А., Курзина И.А. Основы пластической деформации наноструктурных материалов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 304 с.
2. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeebe V.Y., Gozbenko V.E., Karlina A.I., Change in the Properties of Rail Steels during Operation and Reutilization of Rails // Metals. 2023. V. 13. No. 6. P. 1043. <https://doi.org/10.3390/met13061043>
3. Akama M. Rolling Contact Fatigue and Wear of Rails and Wheels: A Comprehensive Re-

view // Machines. 2025. V. 13. No. 10. P. 970. <https://doi.org/10.3390/machines13100970>

4. Olivia Kendall, Anna Paradowska, Ralph Abrahams, Ralph Abrahams, Mark Reid, Cong Qiu, Peter Mutton, Wenyi Yan Residual Stress Measurement Techniques for Metal Joints, Metallic Coatings and Components in the Railway Industry: A Review // Materials. 2023. V. 16. No. 1. P. 232. <https://doi.org/10.3390/ma16010232>

5. Solano-Alvarez W., Bhadeshia H.K.D.H. Steels for rails // Progress in Materials Science. 2024. V. 146. P. 101313. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101313>

6. Kanematsu Y., Uehigashi N., Matsui M., Noguchi S. Influence of a decarburised layer on the formation of microcracks in railway rails: On-site investigation and twin-disc study // Wear. 2022. V. 504-505. P. 204427. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204427>

7. Zhou L., Bai W., Han Z., Wang W., Hu Yu., Ding H., Lewis R., Meli E., Liu Q., Guo J. Comparison of the damage and microstructure evolution of eutectoid and hypereutectoid rail steels under a rolling-sliding contact // Wear. 2022. V. 492-493. P. 204233. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204233>

8. Maich A.A., Gronsky R., Komvopoulos K. Microstructure Evolution and Fretting Wear Mechanisms of Steels Undergoing Oscillatory Sliding Contact in Dry Atmosphere // Materials. 2024. V. 17. No. 8. P. 1737. <https://doi.org/10.3390/ma17081737>

9. Yu M., Duan F. Fatigue damage evolution and lifetime prediction of ferrite-cementite steel with combined plasticity // International Journal of Fatigue. 2025. V. 198. P. 108969. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2025.108969

10. Bai W., Zhou L., Wang P., Hu Yu., Wang W., Ding H., Han Z., Xu X., Zhu M. Damage behavior of heavy-haul rail steels used from the mild conditions to harsh conditions // Wear. 2022. V. 496-497. P. 204290. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204290>

11. Kendall O., Abrahams R., Paradowska A., Reid M., Qiu C., Mutton P., Schläfer T., Yan W. Influence of multi-layer laser cladding depositions and rail curvature on residual stress in light rail components // Engineering Failure Analysis. 2023. V. 150. P. 107330. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107330>

12. Порфирьев М.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Попова Н.А., Шлярова Ю.А. Тонкая структура длинномерных рельсов из заэвтектоидной стали после длительной эксплуатации. Новокузнецк: Полиграфист, 2023. 285 с.

13. Попова Н.А., Громов В.Е., Никоненко Е.Л., Тришкина Л.И., Черкасова Т.В., Соловьёва Ю.В., Шлярова Ю.А., Перегудов О.А. Меха-

низмы упрочнения в металлах и сплавах. Новокузнецк: Полиграфист, 2024. 133 с.

Информация об авторах

Попова Наталья Анатольевна – кандидат технических наук учебно-научной лаборатории Наноматериалы и нанотехнологии ФГБОУ ВО Томского государственного архитектурно-строительного университета;

Куницына Татьяна Семеновна – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры Высшая математика, ФГБОУ ВО Томского государственного архитектурно-строительного университета;

Никоненко Елена Леонидовна – кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры Физика Химия Теоретическая механика (ФХТМ), ФГБОУ ВО Томского государственного архитектурно-строительного университета;

Громов Виктор Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Новокузнецк, Россия, ул. Кирова, 42;

Порфирьев Михаил Анатольевич – младший научный сотрудник Управления научных исследований Сибирского государственного университета, г. Новокузнецк (654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42),

Шугаев Олег Владимирович – старший преподаватель кафедры транспорта и логистики, Сибирский государственный индустриальный университет город, 654007, Новокузнецк, Россия, ул. Кирова, 42;

References

1. Gleser A.M., Kozlov E.V., Koneva N.A., Popova N.A., Kurzina I.A. Plastic Deformation of Nanostructured Materials. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2017. 321 p. <https://doi.org/10.1201/9781315111964>

2. Yelemessov K., Baskanbayeva D., Martyushev N.V., Skeebe V.Y., Gozbenko V.E., Karlina A.I., Change in the Properties of Rail Steels during Operation and Reutilization of Rails // Metals. 2023. V. 13. No. 6. P. 1043. <https://doi.org/10.3390/met13061043>

3. Akama M. Rolling Contact Fatigue and Wear of Rails and Wheels: A Comprehensive Review // Machines. 2025. V. 13. No. 10. P. 970. <https://doi.org/10.3390/machines13100970>

4. Olivia Kendall, Anna Paradowska, Ralph Abrahams, Ralph Abrahams, Mark Reid, Cong Qiu, Peter Mutton, Wenyi Yan Residual Stress

Measurement Techniques for Metal Joints, Metallic Coatings and Components in the Railway Industry: A Review // *Materials*. 2023. V. 16. No. 1. P. 232. <https://doi.org/10.3390/ma16010232>

5. Solano-Alvarez W., Bhadeshia H.K.D.H. Steels for rails // *Progress in Materials Science*. 2024. V. 146. P.101313. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101313>

6. Kanematsu Y., Uehigashi N., Matsui M., Noguchi S. Influence of a decarburised layer on the formation of microcracks in railway rails: On-site investigation and twin-disc study // *Wear*. 2022. V. 504-505. P. 204427. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204427>

7. Zhou L., Bai W., Han Z., Wang W., Hu Yu., Ding H., Lewis R., Meli E., Liu Q., Guo J. Comparison of the damage and microstructure evolution of eutectoid and hypereutectoid rail steels under a rolling-sliding contact // *Wear*. 2022. V. 492–493. P. 204233. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204233>

8. Maich A.A., Gronsky R., Komvopoulos K. Microstructure Evolution and Fretting Wear Mechanisms of Steels Undergoing Oscillatory Sliding Contact in Dry Atmosphere // *Materials*. 2024, V. 17. No. 8. P. 1737. <https://doi.org/10.3390/ma17081737>

9. Yu M., Duan F. Fatigue damage evolution and lifetime prediction of ferrite-cementite steel with combined plasticity // *International Journal of Fatigue*. 2025. V. 198. P. 108969. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2025.108969

10. Bai W., Zhou L., Wang P., Hu Yu., Wang W., Ding H., Han Z., Xu X., Zhu M. Damage behavior of heavy-haul rail steels used from the mild conditions to harsh conditions // *Wear*. 2022. V. 496–497. P. 204290. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204290>

11. Kendall O., Abrahams R., Paradowska A., Reid M., Qiu C., Mutton P., Schläfer T., Yan W. Influence of multi-layer laser cladding depositions and rail curvature on residual stress in light rail components // *Engineering Failure Analysis*. 2023.

V. 150. P. 107330. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107330>

12. Porfiriev M.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Popova N.A., Shlyarov V.V. Fine structure of long-length rails made of hypoeutectoid steel after long-term operation. Novokuznetsk: Poligrafist, 2023. 285 p.

13. Popova N.A., Gromov V.E., Nikonenko E.L., Trishkina L.I., Cherkasova T.V., Solovyova Yu.V., Shlyarova Yu.A., Peregudov O.A. Mechanisms of Hardening in Metals and Alloys. Novokuznetsk: Poligrafist, 2024. 133 p.

Information about the authors

Popova Natalya Anatolyevna is a Candidate of Technical Sciences at the Nanomaterials and Nanotechnology Research Laboratory of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering.

Kunitsyna Tatyana Semyonovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering;

Nikonenko Elena Leonidovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, Chemistry, and Theoretical Mechanics (PCMT), Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering;

Gromov Viktor Evgenievich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after Prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University, 654007, Novokuznetsk, Russia, Kirova Street, 42;

Porfiriev Mikhail Anatolyevich – Junior Researcher of the Research Department of the Siberian State University, Novokuznetsk (654007, Russia, Kemerovo Region, Novokuznetsk, Kirova Street, 42),

Shugaev Oleg Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Transport and Logistics, Siberian State Industrial University, 42 Kirova Street, Novokuznetsk, 654007, Russia;

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 03.07.2026; одобрена после рецензирования 07.09.2026; принята к публикации 14.09.2026.

The article was received by the editorial board on 03 Jul. 2026; approved after reviewing 07 Sep. 2026; accepted for publication 14 Sep. 2026.