Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18. № 3. С. 328–337
Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 2021; 3(18): 328–337

РАЗДЕЛ 2. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Научная статья
05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
УДК 669.539.382:669.17:625.1
doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2021.03.010

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ И УПРОЧНЕНИЕ РЕЛЬСОВ ПОСЛЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Роман Вадимович Кузнецов[1], Виктор Евгеньевич Громов[2], Юрий Федорович Иванов[3†], Юлия Андреевна Рубанникова[4], Василий Евгеньевич Кормышев[5], Антон Алексеевич Юрьев[6], Наталья Анатольевна Попова[7]

[1, 2, 4, 5] Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия
[3] Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия
[6] ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», шоссе Космическое, 19, 654043, Новокузнецк, Россия
[7] Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная, 2, 634002, Томск, Россия
[1] gromov@physics.sibsiu.ru
[2] gromov@physics.sibsiu.ru, https://orcid.org/0000-0002-5147-5343
[3] yufi55@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8022-7958
[4] rubannikova96@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5677-1427
[5] 89236230000@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1381-5773
[6] Ant-yurev@ yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3772-7070
[7] natalya-popova-44@mail.ru

Аннотация. Методами просвечивающей электронной дифракционный микроскопии изучено структурно-фазовое состояние дифференцировано закаленных 100-метровых рельсов на различной глубине до 10 мм в головке рельсов по центральной оси и оси симметрии выкружки после экстремально длительной эксплуатации на экспериментальном кольце РЖД (пропущенный тоннаж 1770 млн. тонн брутто). Отмечено существенное преобразование структурно-фазового состояния зерен пластинчатого перлита, сопровождающееся разрушением пластин цементита путем их разрезания движущимися дислокациями и путем растворения с уходом углерода из решетки цементита на линии дислокаций, малоугловые и большеугловые границы. Установлено, что преобразование структуры пластинчатого перлита протекает более интенсивно в поверхности выкружки по сравнению с поверхностью катания. Показано, что прочность стали определяется совместным действием ряда физических механизмов. На основании результатов просвечивающей электронной микроскопии количественно оценены механизмы упрочнения рельсов и показано, что для поверхности катания основное упрочнение обеспечивают дальнодействующие (внутренние) поля напряжений, а для выкружки основным механизмом является субструктурный. Проведено сравнение зависимостей суммарного предела текучести от расстояния до поверхности головки с данными стали до эксплуатации и после пропущенного тоннажа 691,8 и 1411 млн. тонн брутто. Выявленное уменьшение предела текучести при пропущенном тоннаже 1770 млн. тонн по сравнению с данными после пропущенного тоннажа 1411 млн. тонн может быть связано с формированием зеренно- субзеренной структуры в поверхностных слоях вследствие динамической рекристаллизации стали при экстремально длительной эксплуатации.

Ключевые слова: структурно-фазовое состояние, рельсы, эксплуатация, упрочнение, предел текучести.
Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект №19-32-60001).

Для цитирования: Кузнецов Р.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Рубанникова Ю.А., Кормышев В.Е., Юрьев А.А., Попова Н.А. Структурно-фазовое состояние и упрочнение рельсов после экстремально длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18. № 3. С. 328–337. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2021.03.010.

© Р.В. Кузнецов, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, Ю.А. Рубанникова, В.Е. Кормышев, А.А. Юрьев, Н.А. Попова, 2021

Original article

STRUCTURE-PHASE STATE AND RAILS STRENGTHENING AFTER EXTREMELY LONG-TERM OPERATION

Roman V. Kuznetsov[1], Victor E. Gromov[2], Yurii F. Ivanov[3†], Yulia A. Rubannikova[4], Vasiliy E. Kormyshev[5], Anton A. Yuryev[6], Natalia A. Popova[7]

[1, 2, 4, 5]Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia
[3] Institute of High Current Electronics SB RAS, Academicheskiy Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia
[6] JSC «EVRAZ ZSMK», highway Space, 19, Novokuznetsk, 654043, Russia
[7] Tomsk State University of Architecture and Building, Solyanaya Sq., 2, Tomsk, 634002, Russia
[1] gromov@physics.sibsiu.ru
[2] gromov@physics.sibsiu.ru, https://orcid.org/0000-0002-5147-5343
[3] yufi55@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-8022-7958
[4] rubannikova96@mail.ru, https://orcid.org/0000-0001-5677-1427
[5] 89236230000@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1381-5773
[6] Ant-yurev@ yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-3772-7070
[7] natalya-popova-44@mail.ru

Abstract. Using the methods of transmission electron diffraction microcopy the structure-phase state of differentially quenched 100-meter rails at different depths up to 10 mm in rail head along central axis and symmetry axis of fillet after extremely long-term operation on experimental ring of Russian railways (gross passed tonnage 1770 mln. tons) is investigated. It is noted that the essential transformation of structure-phase state of lamellar pearlite grains is accompanied by cementite plates fracture due to their cutting by moving dislocations and due to dissolution followed by carbon leaving of cementite lattice on dislocation lines, low-angle and large-angle boundaries. It is established that the transformation of lamellar pearlite structure takes place more intensely in fillet surface compared with tread surface. It is shown that rail strength is determined by the total action of a number of physical mechanisms. Based on the transmission electron microscopy study results the rail strengthening mechanisms are evaluated quantitatively and it is shown that the long-range stress fields provide the main surface strengthening of tread surface and substructure mechanism is responsible for fillet strengthening. The comparison of total yield point dependences on the distance to head surface is carried out with the data of initial state and after gross passed tonnage 691.8 and 1411 mln. tons. The revealed decrease of total yield point at gross passed tonnage 1770 mln. tons compared with data after gross passed tonnage 1411 mln. tons can be connected with the formation of fragmented structure in the surface layers due to steel dynamic recrystallization at extremely long-term operation.

Keywords: structure-phase state, rails, operation, strengthening, yield point.
Acknowledgements: The research was financially supported by the grant RFBI (No. 19-32-60001).

For citation: Kuznetsov, R. V., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Rubannikova, Yu. A., Kormyshev, V. E., Yuriev, A. A. & Popova, N. A. (2021). Structure-phase state and rails strengthening after extremely long-term operation. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 3(18), 328–337. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2021.03.010.

Введение

Рассмотрение поведения рельсов при длительной эксплуатации и анализ причин их изъятия вызывает в последнее время большой интерес. Расширение информации в этой области связано как со стремлением к более глубокому пониманию фундаментальных проблем физического материаловедения, так и с практической значимостью, диктуемой непрерывным возрастанием требований к надежности рельсов в современных условиях высоких нагрузок на ось и скоростей движения [1-3].

Сложные процессы, протекающие в рельсах при длительной эксплуатации, приводят к накоплению многочисленных дефектов, что сопровождается ухудшением механических свойств и является причиной выхода рельсов из строя [4-9]. В отечественных 25-метровых объемно-закаленных рельсах производства «Евраз-ЗСМК» при пропущенном тоннаже 500-1000 млн. тонн выявлено формирование наноразмерной многофазной структуры в слое металла, прилегающем к рабочей поверхности (поверхности выкружки и поверхности катания), характеризующейся полным разрушением колоний пластинчатого перлита (поверхност-

ный слой); протеканием начальной стадии динамической рекристаллизации зерен структурно свободного феррита (слой толщиной не менее 2 мм); фрагментацией зерен ферритокарбидной смеси с образованием структуры, в которой частицы карбидной фазы расположены преимущественно по границам субзерен [10-15].

Партия дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов категории ДТ350, выпущенных на этом комбинате в 2013 году, достигла беспрецедентной в практике наработки 1,77 млрд. тонн брутто пропущенного тоннажа на экспериментальном кольце РЖД. Достигнутая величина наработки более чем в 2 раза превышает ресурс рельсов до капитального ремонта пути с полной сменой рельсов.

Совершенствование технологии дифференцированной закалки длинномерных рельсов для формирования высоких эксплуатационных свойств во многом связано с получением информации о структурно-фазовом состоянии и природе упрочнения таких рельсов при экстремально длительной эксплуатации.

Ранее в наших последних работах [16-24] выполнен анализ структурно-фазового состояния и физической природы упрочнения металла дифференцированно закаленных рельсов после длительных (пропущенный тоннаж 691.8 и 1411 млн. т. брутто) полигонных испытаний. В настоящей работе изучено структурно-фазовое состояние поверхности катания и выкружки в головке 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов, формирующееся после пропущенного тоннажа 1770 млн. тонн и проведено сравнение природы упрочнения металла после различных сроков эксплуатации (691,8; 1411 и 1770 млн. тонн).

Материал и методы исследования

Материалом исследования являлись образцы 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов типа Р65 категории ДТ350 из стали Э76ХФ после пропущенного тоннажа 1770 млн. тонн. По содержанию химических элементов металл рельсов соответствует требованиям ТУ 0921-276-01124323-2012: C – 0,73%; Mn – 0,75%; Si – 0,58%; P – 0,012%; S – 0,007%; Cr – 0,42%; Ni – 0,07%; Cu – 0,13%; Al – 0,002%; Ti – 0,003%, Mo – 0,006%; V – 0,04%.

Дефектную субструктуру металла рельсов изучали методами просвечивающей электронной микроскопии [25-27]. Объекты исследования для просвечивающего электронного микроскопа готовили путем утонения пластинок, вырезанных из объемной заготовки на расстоянии 2 и 10 мм от поверхности рельсов (поверхность катания и рабочая выкружка), а также из пластинки, примыкающей к поверхности рельсов.

Результаты и их обсуждение

Ранее в работе [28] показано, что микроструктура металла рельсов сформирована зернами высокодисперсного перлита с незначительными участками структурно-свободного феррита. Основная доля перлита – регулярные колонии с правильным чередованием цементитных и ферритных пластинок. В зоне выкружки и средней части головки рельса в микроструктуре наблюдается значительное количество перлитных колоний с изогнутыми (волнистыми) и разрушившимися пластинами цементита, а также участки вырожденного перлита.

Исследования структуры металла головки рельсов методами просвечивающей электронной микроскопии позволили детализировать структурно-фазовое состояние перлита. Было установлено, что независимо от направления исследования (по радиусу скругления выкружки или вдоль центральной оси головки рельсов) в стали присутствует несколько структурных состояний перлита, которые нами по морфологическому признаку классифицированы следующим образом. Во-первых, собственно структура перлита пластинчатой морфологии, характерной особенностью которого является чередование параллельно расположенных пластин цементита и феррита (рис.1а). Во-вторых, перлит разрушенный, характерной особенностью которого является отсутствие протяженных пластин цементита. Пластины цементита раздроблены и сдвинуты относительно исходной осевой линии (рис.1б). Можно предположить, что такая структура была сформирована в результате срезания и сдвига пластин цементита движущимися дислокациями.

В-третьих, вырожденный перлит (ферритокарбидная смесь), представленный зернами феррита, в которых частицы цементита различной формы и размеров расположены хаотически (рис.1в). В-четвертых, зерна феррита, в объеме которых наблюдается полосовая субструктура, организованная малоугловыми границами (рис.1г). Цементит в такой структуре присутствует в виде частиц округлой формы, расположенных вдоль малоугловых границ.

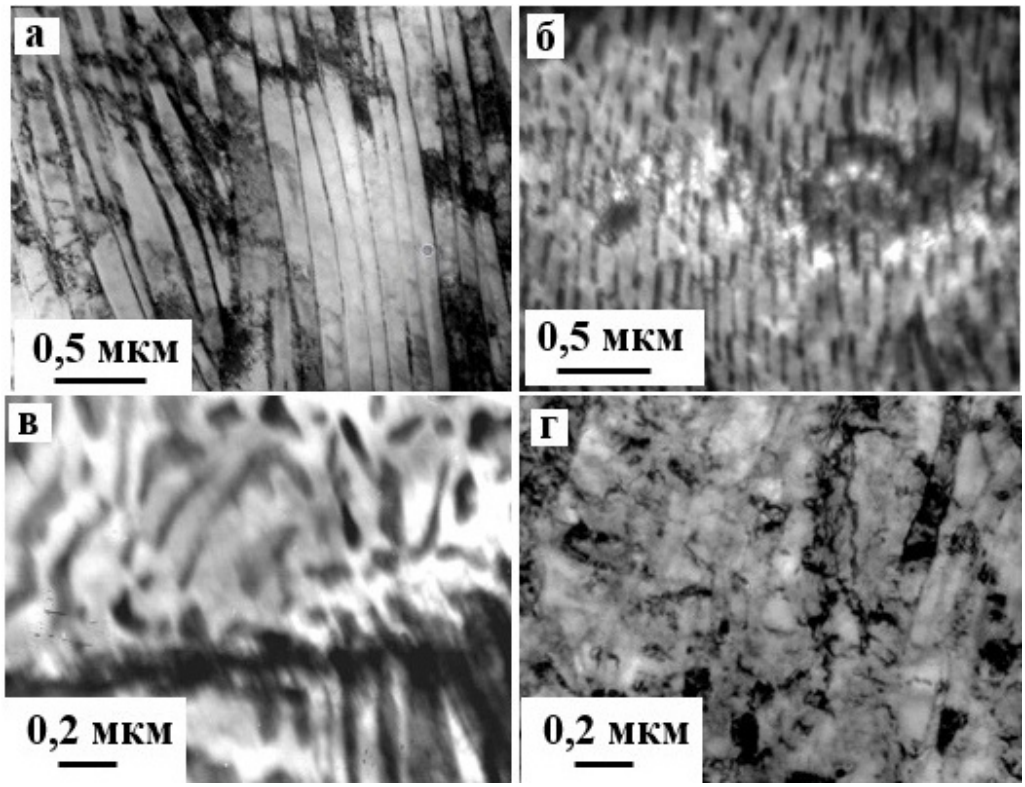

Рис.1. Электронно-микроскопическое изображение структуры металла головки рельсов

В слое, примыкающем к поверхности катания или к поверхности рабочей выкружки, наблюдается еще один тип структуры, а именно, зерна феррита с зеренно-субзеренной структурой. В стыках и вдоль границ субзерен располагаются частицы цементита округлой формы. Размеры таких зерен и субзерен изменяются в пределах от 110 нм до 200 нм. Размеры частиц цементита – от 25 нм до 60 нм. Можно предположить, что данный тип структуры сформировался в результат динамической рекристаллизации стали, имеющей место при циклическом нагружении металла рельсов в процессе эксплуатации.

Количественный анализ, выполненный с использованием методов стереологии, позволил выявить относительное содержание указанных выше морфологических разновидностей структуры металла головки рельсов (рис.2).

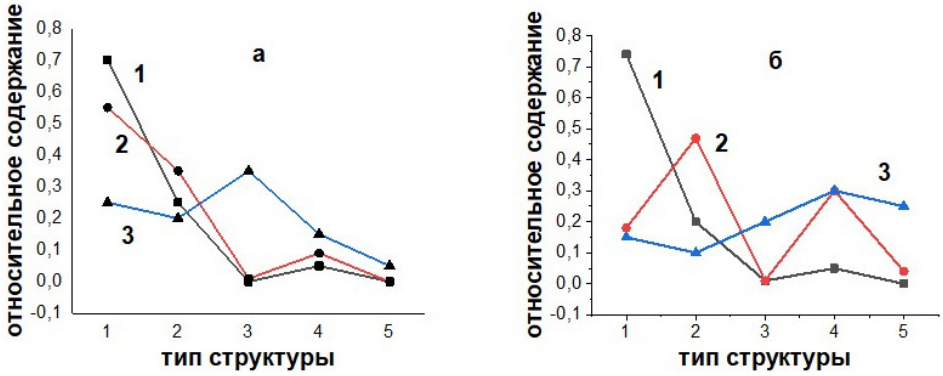

Рис.2. Относительное содержание различных типов структуры металла головки рельсов, выявленных вдоль центральной оси (относительно поверхности катания) (а) и вдоль радиуса скругления рабочей выкружки (б); кривая 1 – относительное содержание типов структуры в слое, расположенном на глубине 10 мм; 2 – в слое, расположенном на глубине 2 мм; 3 – в поверхностном слое. Обозначены следующие типы структуры:
1 – перлит пластинчатой морфологии; 2 – перлит разрушенный; 3 – вырожденный перлит (феррито-карбидная смесь); 4 – зерна феррита, в объеме которых наблюдается полосовая субструктура;
5 – зерна и субзерна феррита субмикронных размеров

Анализируя результаты, представленные на рис.2, можно отметить следующее. Во-первых, преобразование в процессе эксплуатации структуры перлита пластинчатой морфологии относительно центральной оси протекает существенно меньшими темпами по сравнению с изменением структуры относительно радиуса скругления рабочей выкружки. Во-вторых, зерна и субзерна феррита субмикронных размеров формируются исключительно в поверхностном слое металла рельсов. В-третьих, относительное содержание зерен и субзерен феррита субмикронных размеров в поверхностном слое рабочей выкружки в 5 раз выше, чем в поверхностном слое поверхности катания. В совокупности указанные факты свидетельствуют о существенно более высоком уровне термодеформационного преобразования металла рельсов вдоль радиуса рабочей выкружки, по сравнению с металлом вдоль центральной оси.

Выявленные преобразования структуры стали будут существенным образом сказываться на прочностных и пластических характеристиках металла, определяя, в конечном итоге, срок службы изделия. Выявить закономерности, связывающие параметры структуры и прочностные свойства материала, вскрыть физическую природу процесса эволюции свойств, позволяют оценки механизмов упрочнения.

Используя результаты количественного анализа структуры стали и широко апробированные выражения, приведенные в [1, 2, 21, 24, 29], были проведены оценки механизмов упрочнения. Учитывались вклады, обусловленные трением решетки $\Delta\sigma_0$ = 30 МПа, внутрифазными границами $\Delta\sigma(L)$, дислокационной субструктурой $\Delta\sigma(\rho)$, частицами карбидной фазы $\Delta\sigma$(ч), внутренними полями напряжений $\Delta\sigma(h)$, твердорастворным упрочнением $\Delta\sigma$(тв), перлитной составляющей структуры стали $\Delta\sigma$(П).

Общий предел текучести стали в первом приближении, основанном на принципе аддитивности, который предполагает независимое действие каждого из механизмов упрочнения материала, можно представить в виде линейной суммы вкладов отдельных механизмов упрочнения [30-33]:

$$\sigma = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma(L) + \Delta\sigma(\rho) + \Delta\sigma(h) + \Delta\sigma(\text{ч}) + \\ + \Delta\sigma(\text{тв}) + \Delta\sigma(\text{П})$$

Анализируя результаты, приведенные в таблице, можно отметить, что, во-первых, прочность стали является величиной многофакторной и определяется совокупным действием ряда физических механизмов. Во-вторых, прочность металла рельсов зависит от расстояния до поверхности головки, независимо от места анализа (вдоль центральной оси или вдоль оси симметрии выкружки). В-третьих, прочность металла увеличивается по мере приближения к поверхности головки; при этом прочность металла рельсов вдоль оси симметрии выкружки выше, чем вдоль центральной оси. В-четвертых, основным механизмом упрочнения металла в поверхностном слое (в слое, формирующем поверхность головки), после пропущенного тоннажа 1770 млн. тонн является – субструктурный для рабочей выкружки и механизм, обусловленный внутренними полями напряжений, для поверхности катания. На рис.3 приведены зависимости суммарного предела текучести стали рельсов от расстояния до поверхности головки (кривые 1 на (а) и (б)). Для сравнения представлены зависимости после пропущенного тоннажа 691,8 и 1411 млн. тонн и в исходном состоянии [1, 2, 21, 24, 29].

Таблица. Оценки механизмов упрочнения металла рельсов после пропущенного тоннажа 1770 млн. тонн брутто

Параметры, средние по материалу	**Поверхность катания**			**Рабочая выкружка**		
	10 мм	2 мм	Поверхность	10 мм	2 мм	Поверхность
$\Delta\sigma$(П), МПа	142,0	112	50,7	142	36,5	30,4
$\Delta\sigma(L)$, МПа	38,3	68,8	153	39,0	260,1	420,8
$\Delta\sigma(\rho)$, МПа	170	192,5	210	185	185	327,5
$\Delta\sigma(h)$, МПа	255	275	355	465	330	405
$\Delta\sigma$(ч), МПа	98,5	142	216,7	82,7	189,1	219
$\Delta\sigma$(тв), МПа	11	11	11,7	11	11	11,7
$\sigma = \sum_{i=1}^{n} \sigma_i$, МПа	714,8	801,3	997,1	924,7	1011,7	1414,4

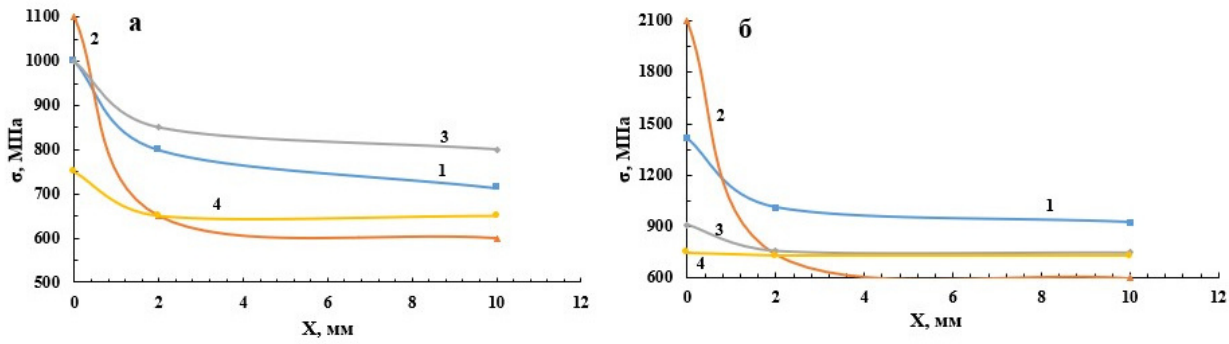

Рис.3. Зависимости суммарного предела текучести стали от расстояния до поверхности головки рельсов вдоль центральной оси (а) и вдоль оси симметрии рабочей выкружки (б); кривая 1 – 1770 млн. т; 2 – 1411 млн. т; 3 – 691,8 млн. т; 4 – исходное состояние

Отчетливо видно, что увеличение пропущенного тоннажа в процессе эксплуатации в интервале 691,8 и 1411 млн. т приводит к существенному (в 1,5-2 раза) повышению прочности стали на пределе текучести. При этом упрочнению подвергается исключительно поверхностный слой металла толщиной не более 2 мм. При большем удалении от поверхности головки прочностные свойства стали остаются на уровне прочностных свойств стали в исходном состоянии.

Увеличение пропущенного тоннажа до 1770 млн. тонн не привело к ожидаемому повышению предела прочности по сравнению с данными 1411 млн. тонн. Как уже отмечалось, это может быть обусловлено формированием зеренно-субзеренной структуры при динамической рекристаллизации вследствие интенсивной деформации при экстремально длительной эксплуатации [34].

Заключение

Методами просвечивающей электронной микроскопии изучено структурно-фазовое состояние поверхности катания и выкружки в головке 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов после пропущенного тоннажа 1770 млн. тонн. Выявлено существенное преобразование структурно-фазового состояния зерен пластинчатого перлита, сопровождающееся разрушением пластин цементита путем их разрезания движущимися дислокациями и путем растворения с уходом углерода из решетки цементита на линии дислокаций, малоугловые и большеугловые границы. На наноразмерном уровне выявлено формирование зеренно-субзеренной структуры, содержащей наноразмерные частицы цементита, расположенные в стыках и вдоль границ зерен и субзерен. Размеры зерен и субзерен изменяются в пределах от 110 нм до 200 нм; размеры частиц цементита – от 25 нм до 60 нм. Установлено, что преобразование в процессе эксплуатации структуры перлита пластинчатой морфологии относительно центральной оси протекает медленнее по сравнению с изменением структуры рабочей выкружки. Показано, что зеренно-субзеренная структура субмикронных размеров формируется исключительно в поверхностном слое металла рельсов. Относительное содержание такой структуры в поверхностном слое рабочей выкружки в 5 раз выше, чем в поверхностном слое поверхности катания. Проведена количественная оценка механизмов упрочнения и установлена зависимость предела текучести стали от расстояния до поверхности головки рельсов. Выполнено сравнение с соответствующими зависимостями для пропущенного тоннажа 691.8 и 1411 млн. тонн. Высказано предположение, что формирование зеренно-субзеренной структуры в поверхностных слоях обусловлено динамической рекристаллизацией стали.

Список литературы

1. Громов В.Е., Перегудов О.А., Иванов Ю.Ф., Коновалов С.В., Юрьев А.А. Эволюция структурно-фазовых состояний металла рельсов при длительной эксплуатации. Новосибирск, Изд-во СОРАН, 2017. 164 с.

2. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Yuriev A.B., Morozov K.V. Microstructure of quenched rails. Cambridge, CISP Ltd, 2016. 153 p.

3. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Юрьев А.А. и др. Природа поверхностного упрочнения дифференцированно закаленных рельсов при дли-

тельной эксплуатации // Деформация и разрушение материалов. 2018. № 4. С. 67–85.

4. Ivanisenko Yu., Fecht H.J. Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels // Steel tech. 2008. V. 3, N 1. P. 19–23.

5. Ivanisenko Yu., Maclaren I., Souvage X., Valiev R.Z., Fecht H.J. Shear-induced α→γ transformation in nanoscale Fe–C composite // Acta Mater. 2006. V. 54. P. 1659–1669.

6. Wild W.L., Hasse B., Wroblewski T., et al. Microstructure alterations at the surface of a heavily corrugated rail with strong ripple formation // Wear. 2003. N 254. P. 876–883.

7. Zhang H.W., Ohsaki S., Mitao S., et al. Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail // Mater. Sci. Eng. A. 2006. N 421. P. 191–199.

8. Lojkowski W., Djahanbakhsh M., Bürkle G., et al. Nanostructure formation on the surface of railway tracks // Mater. Sci. Eng. A. 2001. N 303. P. 197–208.

9. Ishida M. Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies // Electron. J. Struct. Eng. 2013. N 13. P. 67–74.

10. Gromov V.E., Morozov K.V., Ivanov Yu.F., Aksenova K.V., Peregudov O.A., Semin A.P. Formation and evolution of structure-phase states in rails after drawn resource // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2016. N 1. P. 38–44.

11. Gromov V.E., Peregudov O.A., Ivanov Y.F., Glezer A.M., Morozov K.V., Aksenova K.V., Semina O.A. Physical nature of rail strengthening in long term operation // AIP Conference Proceedings. 2016. V. 1783. N 020069. 4 p.

12. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Glezer A.M., Peregudov O.A., Morozov K.V. Nature of the structural degradation rail surfaces during operation // Bulletin of Russian Academy of Science: Physics. 2016. V. 80, N 12. P. 1483–1488.

13. Peregudov O.A., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Morozov K.V., Konovalov S.V. Structural and phase states in high-quality rail // Steel in translation. 2016. V. 46, N 4. P. 260–263.

14. Peregudov O.A.,Morozov K.V., Gromov V.E., Glezer A.M., Ivanov Yu.F. Formation of internal stress fields in rails during long-term operation // Russian metallurgy. 2016. V. 2016, N 4. P. 371–374.

15. Gromov V.E., Ivanov Y.F., Morozov K.V., Peregudov O.A., Semina O.A. Long-term operation of rail steel: degradation of structure and properties of surface layer// Journal of surface investigation. X-ray, Synchrotron and Neytron techniques. 2016. V. 10, N 5. P. 1101–1105.

16. Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Yuriev A.A., Semin A.P., Sundeev R.V. Structural phase states and properties of rails after long-term operation // Materials Letters. 2020. V. 268. P. 127499.

17. Кормышев В.Е., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Юрьев А.А., Полевой Е.В. Структура и свойства дифференцированно закаленных 100-м рельсов после экстремально длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2019. Т. 16, № 4. С. 538–546.

18. Кормышев В.Е., Громов В.Е., Ю.Ф. Иванов, Глезер А.М. Структура дифференцированно закаленных рельсов при интенсивной пластической деформации // Деформация и разрушение материалов. 2020. № 8. С. 16–20.

19. Панин В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Кормышев В.Е. Роль кривизны решетки в деградации структуры поверхностного слоя металла рельсов при длительной эксплуатации // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2020. Т 494. С. 68–71.

20. Панин В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Громов В.Е., Панин С.В., Кормышев В.Е., Рубанникова Ю.А. Эволюция тонкой структуры и свойств металла рельсов при длительной эксплуатации // Физ. мезомех. 2020. Т. 23, № 5. С. 85–94.

21. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kormyshev V.E., Yuriev A.A., Semin A.P., Rubannikova Yu.A. Change in Structural-Phase States and Properties of Lengthy Rails during Extremely Long-Term Operation // Progress in Physics of Metals. 2020. V. 21. No. 4. P. 527–553.

22. Yuriev A., Kormyshev V., Gromov V., Ivanov Y., Semin A. Formation of Gradient Structure in Rails at Long-Term Operation // Materials Research. 2020; 23(6): e20200258.

23. Сарычев В.Д., Невский С.А., Кормышев В.Е., Юрьев А.А., Громов В.Е. Модель формирования наноструктурных слоев при длительной эксплуатации рельсов // Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия. 2020. Т. 63, № 9. С. 699–706.

24. Yuriev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A., Starostenkov M.D., Tabakov P.Y. Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation. Materials Research Forum LLC, 2021. 193 p.

25. Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer International Publishing, 2016. 196 p.

26. Kumar C.S.S.R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. New York: Springer, 2014. 717 p.

27. Carter C.B., Williams D.B. Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 2016. 518 p.

28. Кузнецов Р.В., Громов В.Е., Полевой Е.В., Рубанникова Ю.А., Кормышев В.Е. Эволюция структурно-фазовых состояний и свойств дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при экстремально длительной эксплуатации. Сообщение 3. структура и свойства рельсов после пропущенного тоннажа 1,77 млрд. тонн // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2021. № 2. С. 20–29.

29. Ivanov Yu., Gromov V., Yuriev A., Kormyshev V., Rubannikova Yu., Semin A. Deformation strengthening mechanisms of rails in extremely long-term operation // Journal of Materials Research and Technology. 2021. V. 11. P. 710–718.

30. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и обработка сталей. М.: Металлургия, 1982. 184 с.

31. Беленький Б.З., Фарбер Б.М., Гольдштейн М.И. Оценки прочности малоуглеродистых низколегированных сталей по структурным данным // ФММ. 1975. Т. 39. № 3. С. 403–409.

32. Sieurin H., Zander J., Sandström R. Modelling solid solution hardening in stainless steels // Mater. Sci. Eng. A. 2006. V. 415. P. 66–71.

33. Прнка Т. Количественные соотношения между параметрами дисперсных выделений и механическими свойствами сталей // Металловедение и терм. обр. стали. 1979. № 7. С. 3–8.

34. Глезер А.М., Метлов Л.С. Физика мегапластической (интенсивной) деформации твердых тел // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. Вып. 6. С. 1090–1097.

Информация об авторах

Р. В. Кузнецов – соискатель кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

В. Е. Громов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

Ю. Ф. Иванов – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института Сильноточной электроники СО РАН.

Ю. А. Рубанникова – аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля Сибирского государственного индустриального университета.

В. Е. Кормышев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник УНИ Сибирского государственного индустриального университета.

А. А. Юрьев – кандидат технических наук. Менеджер по управлению продуктами и ресурсами АО ЕВРАЗ ЗСМК.

Н. А. Попова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Томского государственного архитектурно-строительного университета.

References

1. Gromov, V. E., Peregudov, O. A., Ivanov, Yu. F., Konovalov, S. V. & Yuryev, A. A. (2017). *Evolyutsiya strukturno-fazovykh sostoyaniy metalla rel'sov pri dlitel'noy ekspluatatsii*. Novosibirsk, Izd-vo SORAN. P. 164. (In Russ.).

2. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Yuriev, A. B. & Morozov, K. V. (2016). *Microstructure of quenched rails*. Cambridge, CISP Ltd. P. 153.

3. Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E. & Yuriev, A. A., et al. (2018). Priroda poverkhnostnogo uprochneniya dif-ferentsirovanno zakalennykh rel'sov pri dlitel'noy ekspluatatsii. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*. 4. 67–85. (In Russ.).

4. Ivanisenko, Yu. & Fecht H. J. (2008). Microstructure modification in the surface layers of railway rails and wheels. *Steel tech*. 1(3). 19–23.

5. Ivanisenko, Yu., Maclaren, I., Souvage, X., Valiev, R. Z. & Fecht, H. J. (2006). Shear-induced α→γ transformation in nanoscale Fe–C composite. *Acta Mater*. (54). 1659–1669.

6. Wild, W. L., Hasse, B. & Wroblewski, T., et al. (2003). Microstructure alterations at the surface of a heavily corrugated rail with strong ripple formation. *Wear*. 254. 876–883.

7. Zhang, H. W., Ohsaki, S. & Mitao, S., et al. (2006). Microstructural investigation of white etching layer on pearlite steel rail. *Mater. Sci. Eng. A*. 421. 191–199.

8. Lojkowski, W., Djahanbakhsh, M. & Bürkle, G., et al. (2001). Nanostructure formation on the surface of railway tracks. *Mater. Sci. Eng. A*. 303. 197–208.

9. Ishida, M. (2013). Rolling contact fatigue (RCF) defects of rails in Japanese railways and its mitigation strategies. *Electron. J. Struct. Eng*. 13. 67–74.

10. Gromov, V. E., Morozov, K. V., Ivanov, Yu. F., Aksenova, K. V., Peregudov, O. A. & Semin A. P. (2016). Formation and evolution of structure-phase states in rails after drawn resource. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 1. 38–44.

11. Gromov, V. E., Peregudov, O. A., Ivanov, Y. F., Glezer, A. M., Morozov, K. V., Aksenova, K. V. & Semina, O. A. (2016). Physical nature of rail strengthening in long term operation. *AIP Conference Proceedings*. 020069 (1783). P. 4.

12. Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Glezer, A. M., Peregudov, O. A. & Morozov, K. V. (2016). Nature of the structural degradation rail surfaces during operation. *Bulletin of Russian Academy of Science: Physics*. 12(80). 1483–1488.

13. Peregudov, O. A., Gromov, V. E., Ivanov, Y. F., Morozov, K. V. & Konovalov, S. V. (2016). Structural and phase states in high-quality rail. *Steel in translation*. 4(46). 260–263.

14. Peregudov, O. A., Morozov, K. V., Gromov, V. E., Glezer, A. M. & Ivanov, Yu. F. (2016). Formation of internal stress fields in rails during long-term operation. *Russian metallurgy*. 4(2016). 371–374.

15. Gromov, V. E., Ivanov, Y. F., Morozov, K. V., Peregudov, O. A. & Semina, O. A. (2016). Long-term operation of rail steel: degradation of structure and properties of surface layer. Journal *of surface investigation. X-ray, Synchrotron and Neytron techniques*. 5(10). 1101–1105.

16. Kormyshev, V. E., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Glezer, A. M., Yuriev, A. A., Semin, A. P. & Sundeev, R.V. (2020). Structural phase states and properties of rails after long-term operation. *Materials Letters*. (268). 127499.

17. Kormyshev, V. E., Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Yuryev, A. A. & Polevoy, E. V. (2019). Struktura i svoystva differentsirovanno zakalennykh 100-m rel'sov posle ekstremal'no dlitel'noy ekspluatatsii. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS))*. 4(16). 538–546. (In Russ.).

18. Kormyshev, V. E., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F. & Glezer, A. M. (2020). Struktura differentsirovanno zakalennykh rel'sov pri intensivnoy plasticheskoy deformatsii. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*. 8. 16–20. (In Russ.).

19. Panin, V. E., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Yuryev, A. A. & Kormyshev, V. E. (2020). Rol' krivizny reshetki v degradatsii struktury poverkhnostnogo sloya metalla rel'sov pri dlitel'noy ekspluatatsii. *Doklady RAN. Fizika, tekhnicheskiye nauki*. (494). 68–71. (In Russ.).

20. Panin, V. E., Ivanov, Yu. F., Yuryev, A. A., Gromov, V.E., Panin, S. V., Kormyshev, V. E. & Rubannikova, Yu. A. (2020). Evolyutsiya tonkoy struktury i svoystv metalla rel'sov pri dlitel'noy ekspluatatsii. *Fiz. mezomekh*. 5(23). 85–94. (In Russ.).

21. Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Kormyshev, V. E., Yuriev, A. A., Semin, A. P. & Rubannikova, Yu. A. (2020). Change in Structural-Phase States and Properties of Lengthy Rails during Extremely Long-Term Operation. *Progress in Physics of Metals*. 4(21). 527–553.

22. Yuriev, A., Kormyshev, V., Gromov, V., Ivanov, Yu. & Semin, A. (2020). Formation of Gradient Structure in Rails at Long-Term Operation. *Materials Research*. 23(6). e20200258.

23. Sarychev, V. D., Nevskiy, S. A., Kormyshev, V. E., Yuryev, A. A. & Gromov, V. E. (2020). Model' formirovaniya nanostrukturnykh sloyev pri dlitel'noy ekspluatatsii rel'sov. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Chernaya Metallurgiya*. 9(63). 699–706. (In Russ.).

24. Yuriev, A. A., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Rubannikova, Yu. A., Starostenkov, M. D. & Tabakov, P. Y. (2021). Structure and Properties of Lengthy Rails after Extreme Long-Term Operation. *Materials Research Forum LLC*. P. 193.

25. Egerton, F. R. (2016). *Physical Principles of Electron Microscopy*. Basel: Springer International Publishing. P. 196.

26. Kumar, C. S. S. R. (2014). *Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer. P. 717.

27. Carter, C. B. & Williams, D. B. (2016). *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing. P. 518.

28. Kuznetsov, R. V., Gromov, V. E., Polevoy, E. V., Rubannikova, Yu. A. & Kormyshev, V. E. (2021). Evolyutsiya strukturno-fazovykh sostoyaniy i svoystv differentsirovanno zakalennykh 100-metrovykh rel'sov pri ekstre-

mal'no dlitel'noy ekspluatatsii. Soobshcheniye 3. struktura i svoystva rel'sov posle propushchennogo tonnazha 1,77 mlrd. tonn. *Problemy chernoy metallur-gii i materialovedeniya*. 2. 20–29. (In Russ.).

29. Ivanov, Yu., Gromov, V., Yuriev, A., Kormyshev, V., Rubannikova, Yu. & Semin, A. (2021). Deformation strengthening mechanisms of rails in extremely long-term operation. *Journal of Materials Research and Technology*. (11). 710–718.

30. Pikering, F. B. (1982). *Fizicheskoye metallovedeniye i obrabotka staley*. M.: Metallurgiya. P. 184. (In Russ.).

31. Belen'kiy, B. Z., Farber, B. M. & Gol'dshteyn, M. I. (1975). Otsenki prochnosti malouglerodistykh nizkolegirovannykh staley po strukturnym dannym. *FMM*. 3(39). 403–409. (In Russ.).

32. Sieurin, H., Zander, J. & Sandström, R. (2006). Modelling solid solution hardening in stainless steels. *Mater. Sci. Eng. A*. (415). 66–71.

33. Prnka, T. (1979). Kolichestvennyye sootnosheniya mezhdu parametrami dispersnykh vydeleniy i mekhanicheskimi svoystvami staley. *Metallovedeniye i term. obr. stali*. 7. 3–8. (In Russ.).

34. Glezer, A. M. & Metlov, L. S. (2010). Fizika mega-plasticheskoy (intensivnoy) deformatsii tver-dykh tel. *Fizika tverdogo tela*. 6(52). 1090–1097. (In Russ.).

Information about the authors

R. V. Kuznetsov – Post-graduate Student of the Department of Natural Science. prof. V.M. Finkel Siberian State Industrial University

V. E. Gromov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

Yu. F. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Institute of High Current Electronics SB RAS.

Yu. A. Rubannikova – Post-graduate student of the Department of Natural Sciences named after prof. V.M. Finkel, Siberian State Industrial University.

V. E. Kormyshev – Candidate of Technical Sciences. Senior Researcher, UNI, Siberian State Industrial University.

A. A. Yuriev – Candidate of Technical Sciences. Product and Resource Management Manager of EVRAZ ZSMK JSC.

N. A. Popova – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Tomsk State University of Architecture and Building.

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

Статья поступила в редакцию 18.06.2021; одобрена после рецензирования 05.07.2021; принята к публикации 13.07.2021.

The article was received by the editorial board on 18 June 21; approved after reviewing 05 July 21; accepted for publication 13 July 21.