

УДК 669.539.382:669.17

ФОРМИРОВАНИЕ ПРИ ЗАКАЛКЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ РЕЛЬСОВ И ЕЕ ЭВОЛЮЦИЯ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ*

В.Е. Громов¹, В.Е. Кормышев¹, О.А. Перегудов², Ю.Ф. Иванов³, Ю.А. Рубанникова¹

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

²Омский государственный технический университет, Омск, Россия

³Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

Аннотация. Методами современного физического материаловедения проведены исследования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры и трибологических свойств, формирующихся на различных расстояниях по центральной оси и по выкружке в головке объемно и дифференцированно закаленных рельсов в исходном состоянии и после пропущенного тоннажа 691,8 и 1411 млн. т брутто. Для зерен пластинчатого перлита, феррито-карбидной смеси и структурно-свободного феррита получены значения скалярной плотности дислокаций.

Ключевые слова: тонкая структура, свойства, рельсы, закалка, упрочнение, эксплуатация.

GENESIS OF THIN STRUCTURE OF RAILS AT HARDENING AND ITS EVOLUTION AT LONG OPERATION

V.E. Gromov¹, V.E. Kormyshev¹, O.A. Peregudov², Yu.F. Ivanov³, Yu.A. Rubannikova¹

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

²Omsk State Technical University, Omsk, Russia

³Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

Abstract. By means of modern physical materials science structure, phase composition, defective substructure and tribological properties that are generated at various distances along the central axis and along the fillet in the head of volumetric and differentially hardened rails in the initial state and after the passed tonnage of 691.8 and 1411 million tons gross have been investigated. For grains of lamellar perlite, ferrite-carbide mixture, and structurally free ferrite, values of scalar density of dislocations are obtained.

Keywords: fine structure, properties, rails, hardening, hardening, operation.

Введение

Эксплуатационная стойкость железнодорожных рельсов во многом определяется структурно-фазовым состоянием, формируемым при термообработке. Несмотря на ряд недостатков объемной закалки рельсов в масле эта технология термического упрочнения еще используется на металлургических предприятиях. Целесообразность дифференцированной закалки сжатым воздухом

с прокатного нагрева, особенно для 100-метровых рельсов, обусловлена экономическими соображениями. Возрастающие требования российских железных дорог по дифференцированной прочности по сечению рельсов и другим важным параметрам могут быть удовлетворены только технологией дифференцированной закалки. Для разработки режимов дифференцированной закалки, которые могут обеспечивать требуемые механические и эксплуатационные свойства, особенно для рельсов специальных категорий, необходим анализ природы формирования и эволюции

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-32-60001.

структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры. В этом аспекте полезными могут оказаться данные по структуре, фазовому составу и дефектной субструктуре объемно закаленных рельсов, производство которых имеет уже более чем 50-летнюю историю.

Проблема формирования и эволюции структуры и свойств рельсов при длительной эксплуатации представляет сложный комплекс взаимосвязанных научных и технических вопросов. С учетом того, что кинетика процессов формирования структурно-фазовых состояний связана с основами теории прочности и пластичности, представляется исключительно важной информация о параметрах тонкой структуры рельсов в разных сечениях. 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 больших нагрузок на ось и высоких скоростей движения. Вполне очевидно, что при интенсивных деформационных воздействиях, реализуемых при длительной эксплуатации, могут происходить различные процессы (рекристаллизационные, релаксационные, фазовые переходы, распад и образование фаз, аморфизация и т.д.). Эти процессы приводят к эволюции структурно-фазовых состояний, которая сопровождается изменением (ухудшением) механических свойств. Именно поэтому выявление природы и закономерностей эволюции структуры, фазового состава и дефектной субструктуры в головке рельсов при длительной эксплуатации приобретает особую актуальность.

Цель настоящей работы – выявление на различных масштабных уровнях закономерностей формирования структуры, фазового состава и дефектной субструктуры рельсов производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК) различных категорий, подвергнутых объемной и дифференцированной закалке, и их эволюция при длительной эксплуатации.

Формирование тонкой структуры при объемной и дифференцированной закалке

Установлено, что для объемно закаленных рельсов категорий «В», «ИК» и «НЭ» и дифференцированно закаленных по трем различным режимам рельсов структура представлена зернами перлита пластинчатой морфологии (рис. 1, а),

зернами феррита, в объеме которых наблюдаются частицы цементита разнообразной формы (зерна феррито-карбидной смеси) (рис. 1, б) и зернами структурно-свободного феррита, не содержащими частиц карбидной фазы (рис. 1, в) [1 – 3].

Основной структурной составляющей рельсов после объемной закалки являются зерна пластинчатого перлита. Относительная объемная доля зерен феррито-карбидной смеси изменяется в пределах 0,13 – 0,50, структурно-свободного феррита – в пределах 0,03 – 0,06 структуры материала. Зависимости относительного содержания морфологических составляющих структуры стали по центральной оси и выкружке рельсов от расстояния до поверхности катания носят выраженный градиентный характер (мезоуровень).

Для объемно закаленных рельсов всех категорий скалярная плотность дислокаций и величина межпластинчатого расстояния колоний перлита слабо зависят от направления исследования и расстояния до поверхности. Эти показатели не могут быть использованы в качестве параметров, характеризующих градиентность структуры (микроуровень). На наноуровне таким параметром является кривизна кручения кристаллической решетки.

Выполненные оценки механизмов упрочнения объемно закаленных рельсов показали, что зерна феррито-карбидной смеси являются более прочными структурными составляющими по сравнению с зернами пластинчатого перлита [4 – 6].

Основным типом формирующейся структуры, имеющей выраженный градиентный характер, дифференцированно закаленных рельсов является перлит пластинчатой морфологии, относительная объемная доля которого меняется в пределах 0,34 – 0,87. Доля зерен феррито-карбидной смеси составляет 0,12 – 0,65 структуры стали. С увеличением расстояния до поверхности катания относительная объемная доля пластинчатого перлита увеличивается, а доля зерен феррито-карбидной смеси и структурно-свободного феррита уменьшаются.

Величина межпластинчатого расстояния изменяется в пределах от 105 до 200 нм, снижается при переходе от поверхности катания к слою на глубине 10 мм или не зависит от расстояния до поверхности катания. В зернах феррито-карбидной смеси величина скалярной плотности дислокаций несколько выше, чем в ферритной составляющей зерен перлита независимо от режима закалки, направления исследования и расстояния исследуемого слоя от поверхности образца. Она слабо зависит от расстояния до поверхности.

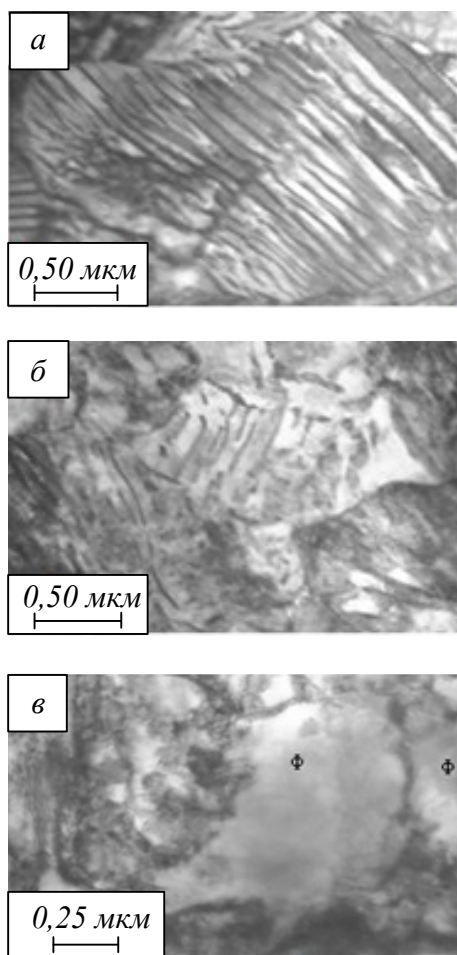


Рис. 1. Изображения ПЭМ структуры рельсов категории «ИК» (Ф – зерно структурно свободного феррита)

Сравнительным анализом фазового состава и дефектной субструктуры объемов рельсов, расположенных по центральной оси и выкружке, показано, что при объемной закалке по сравнению с дифференцированной формируется более однородная в морфологическом отношении структура (относительное содержание зерен перлита, феррита, феррито-карбидной смеси) и структура зерен перлита (межпластинчатое расстояние) в приповерхностном слое (толщиной примерно 2 мм) и менее однородная – в слое, расположенном на расстоянии примерно 10 мм от поверхности катания [7 – 9].

После объемной закалки (по сравнению с дифференцированной) структура рельсов менее однородна по плотности концентраторов напряжений в слое толщиной примерно 2 мм и более однородна в слое, расположенном на расстоянии примерно 10 мм от поверхности катания.

Закалка рельсов сопровождается формированием внутренних полей напряжений, величина которых зависит от типа концентратора напряжений. Наиболее опасными, способными быть источниками трещин при эксплуатации, являются границы раздела глобулярная частица цемен-

тита – матрица. Такие потенциально опасные концентраторы формируются преимущественно в рельсах, подвергнутых объемной закалке.

Изменение тонкой структуры объемно закаленных рельсов при длительной эксплуатации

После 500 млн. т брутто пропущенного тоннажа по центральной оси головки рельсов [10 – 12]:

- выявлено снижение износостойкости (примерно в три раза), коэффициента трения (примерно в 1,4 раза), повышение микротвердости (примерно в 1,7 раза) поверхности катания;

- установлено формирование в поверхностном слое высокодефектной нанокристаллической многофазной структуры;

- механизм разрушения структуры пластинчатого перлита зависит от расстояния до поверхности катания: в поверхностном слое реализуется преимущественно механизм разрезания пластин цементита движущимися дислокациями с последующим растворением частиц; в слое, расположенном на расстоянии примерно 2 мм от поверхности катания, реализуется преимущественно механизм растворения пластин цементита с уходом атомов углерода на дислокации;

- выявлен факт динамического старения материала рельсовой стали, приводящего к выделению наноразмерных частиц карбидной фазы размером 3 – 5 нм.

После 500 млн. т брутто пропущенного тоннажа по выкружке рельсов (рис. 2) [13 – 15]:

- обнаружено нарушение сплошности в слое толщиной до 100 мкм, являющееся следствием эксплуатации рельсов;

- выявлено снижение (примерно в 1,2 раза) микротвердости поверхности;

- в слое глубиной до 2 мм в 1,5 – 2,0 раза повысилась скалярная плотность дислокаций;

- отмечено протекание в стали при эксплуатации многоступенчатого процесса: растворение частиц цементита исходного состояния, переход атомов углерода на дислокации (в атмосферы Коттрелла и ядра дислокаций), перенос дислокациями атомов углерода в объем ферритных зерен или ферритных прослоек перлитных колоний, повторное выделение атомов углерода с образованием наноразмерных частиц цементита округлой формы;

- приближение к поверхности выкружки рельсов сопровождается увеличением количества изгибных экстинкционных контуров на единицу площади поверхности материала (возрастает число концентраторов напряжения) и уменьшением поперечных размеров контуров (увеличивается амплитуда внутренних дальнедействующих полей напряжений).

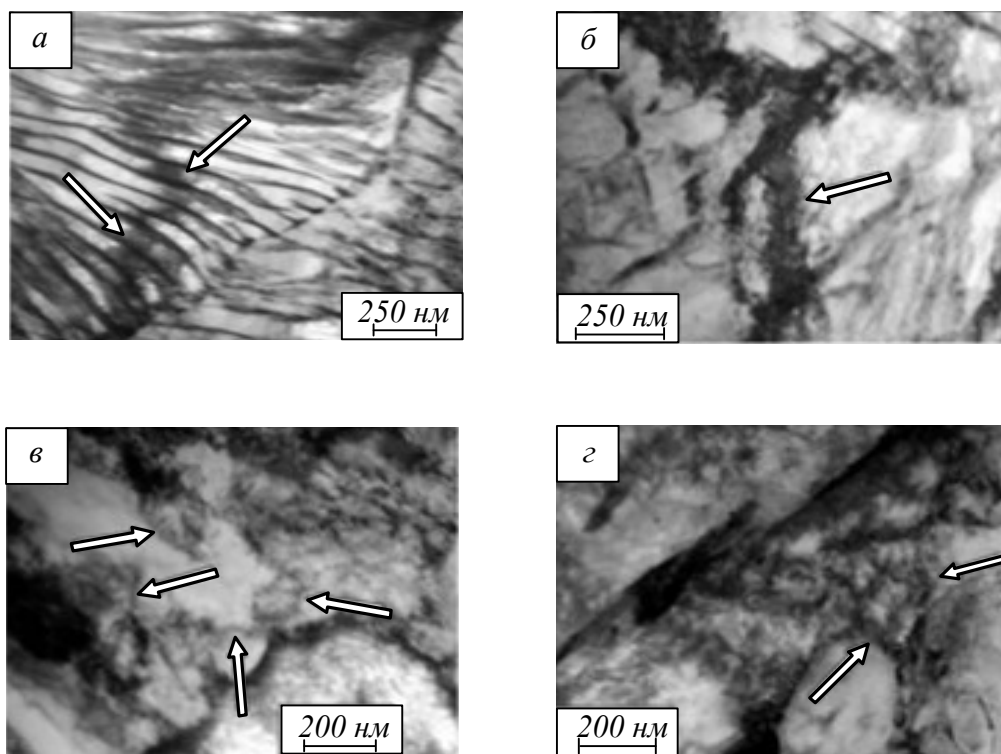


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры выкружки рельсов после пропущенного тоннажа 500 млн. т брутто:

а, б – слой на расстоянии 2 мм от поверхности выкружки; в, г – поверхностный слой выкружки (стрелками указаны изгибные экстинкционные контуры)

После пропущенного тоннажа 1000 млн. т брутто по центральной оси головки рельсов выявлено [16 – 18]:

- снижение износостойкости (примерно в 3,4 раза), коэффициента трения (примерно в 1,15 раза) и микротвердости (примерно в 1,5 раза) в слое до 2 мм;

- формирование в процессе эксплуатации поверхностного слоя толщиной до 40 мкм, содержащего большое количество микропор и микротрещин;

- формирование градиентной субструктуры, характеризующейся полным разрушением колоний пластинчатого перлита (поверхностный слой); протеканием начальной стадии динамической рекристаллизации зерен структурно свободного феррита (слой толщиной не менее 2 мм); фрагментацией зерен феррито-карбидной смеси с образованием структуры, в которой частицы карбидной фазы расположены преимущественно по границам субзерен (слой толщиной не менее 2 мм).

После пропущенного тоннажа 1000 млн. т брутто в головке рельсов по выкружке [19 – 22]:

- выявлены несплошности, проходящие под углом к поверхности выкружки на глубину до 0,5 мм;

- формируется упрочненный поверхностный слой толщиной примерно до 9 мм с повышенной в 1,5 – 2,0 раза микротвердостью;

- образуется фрагментированная субструктура поверхностного слоя (размеры фрагментов 100 –

150 нм), границы которой декорированы наноразмерными частицами карбидной фазы (15 – 20 нм);

- на глубине 2 мм образуется существенно неоднородная структура с сильно разориентированными областями пластинчатого перлита (полный угол разориентации фрагментов примерно 7°) и растворенными пластинами цемента, на месте которых формируются частицы карбидной фазы округлой формы с размерами 15 – 30 нм.

Эволюция структуры и свойств дифференцированно закаленных рельсов в процессе длительной эксплуатации

При длительной эксплуатации дифференцированно закаленных рельсов (пропущенный тоннаж 691,8 и 1411 млн. т брутто) выявлены многочисленные несовершенства структуры пластинчатого перлита – основной структурной составляющей рельсовой стали. Наблюдается чередующаяся структура типа «гребенки» (обозначена стрелками на рис. 3, а), разрывы пластин цемента (ферритные мостики) (рис. 3, б).

На ПЭМ изображениях зерен перлита выявлено наличие изгибных контуров, что указывает на изгиб-кручение кристаллической решетки. Показано, что источниками изгиба-кручения кристаллической решетки (концентраторами напряжений) являются преимущественно границы раздела пластин феррита и цемента.

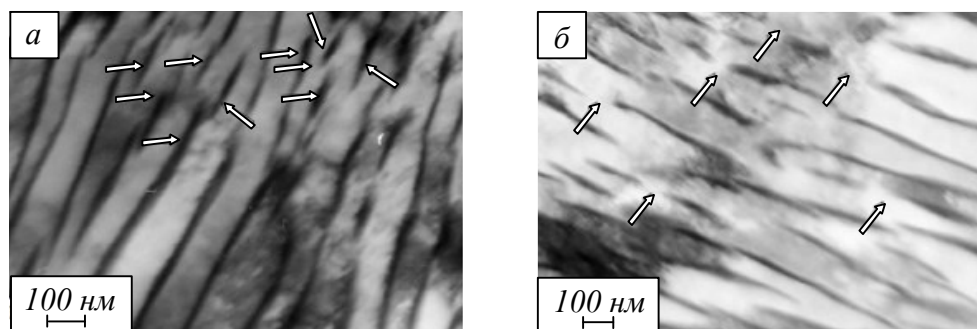


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры пластинчатого перлита: а – структура типа «гребенки»; б – ферритные мостики (указаны стрелками)

В большинстве наблюдаемых случаев контуры располагаются перпендикулярно границе раздела. Источником кривизны-кручения кристаллической решетки материала могут являться и торцы пластин цементита, а также границы раздела зерен перлита.

Длительная эксплуатация рельсов сопровождается деформационным преобразованием преимущественно зерен пластинчатого перлита, а именно, разрушением пластин цементита.

Длительная эксплуатация рельсов сопровождается разрушением пластин цементита, которое максимально в поверхностных слоях толщиной до 2 мм независимо от направления исследования. При этом относительное содержание зерен разрушенного перлита на поверхности катания более чем в два раза выше, чем в поверхностном слое выкружки [23 – 26].

Скалярная плотность дислокаций ферритной составляющей колоний перлита по центральной оси и по выкружке имеет градиентный характер. Для разрушенных зерен перлита скалярная плотность дислокаций снижается при удалении от поверхности по выкружке от $3,8 \cdot 10^{10}$ до $2,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. При удалении от поверхности катания по центральной оси скалярная плотность дислокаций максимальна на контактной поверхности для разрушенных зерен перлита, а для неразрушенных зерен – на расстоянии 10 мм от поверхности.

Избыточная плотность дислокаций, характеризующая уровень полей напряжений, немонотонно убывает с удалением от поверхности катания. При этом максимальная величина фиксируется на контактной поверхности выкружки независимо от состояния перлитных колоний (разрушены или нет). По центральной оси максимальная величина достигается в слое, расположенном на расстоянии 2 мм от поверхности катания [27 – 30].

Показано, что длительная эксплуатация рельсов сопровождается одновременным протеканием двух процессов разрушения пластин цементита:

путем разрезания скользящими дислокациями и растаскивания их осколков и в результате вытягивания атомов углерода из кристаллической решетки цементита вследствие заметной разницы энергии связи атомов углерода с дислокациями ($\sim 0,6 \text{ эВ}$) и с атомами железа в кристаллической решетке цементита ($\sim 0,4 \text{ эВ}$).

Выполнены оценки относительного содержания атомов углерода на структурных элементах стали. Показано, что если в исходном состоянии основное количество атомов углерода сосредоточено в частицах цементита, то после длительной эксплуатации рельсов местом расположения атомов углерода наряду с частицами цементита являются дефекты кристаллической структуры (дислокации, границы зерен и субзерен).

Выполнены теоретические оценки аддитивного предела текучести металла по центральной оси и по выкружке на основе многофакторного анализа упрочнения, обусловленного упрочнением частицами карбидной фазы, упрочнением за счет образования перлитной структуры и формирования дислокационной субструктуры, упрочнением дальнедействующими полями напряжений и твердорастворным упрочнением. Показано, что независимо от направления анализа и расстояния до рабочей поверхности основной вклад в упрочнение вносит дислокационная субструктура [31, 32].

Выводы

Методами современного физического материаловедения проведены исследования структуры, фазового состава, дефектной субструктуры и трибологических свойств, формирующихся на различных расстояниях по центральной оси и по выкружке в головке объемно и дифференцированно закаленных рельсов в исходном состоянии и после пропущенного тоннажа 691,8 и 1411 млн. т брутто.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Громов В.Е., Волков К.В., Иванов Ю.Ф., Морозов К.В. и др. Формирование тонкой структуры металла рельсов повышенной износостойкости // Вопросы материаловедения. 2013. Т. 76. № 4. С. 15 – 23.
2. Громов В.Е., Волков К.В., Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Коновалов С.В., Алсараева К.В. Структура, фазовый состав и дефектная субструктура рельсов высшей категории качества // Изв. вуз. Физика. 2014. № 2. С. 72 – 76.
3. Громов В.Е., Волков К.В., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.Б., Коновалов С.В., Морозов К.В. Формирование тонкой структуры в рельсах низкотемпературной надежности // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. № 4. С. 61 – 68.
4. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Волков К.В., Морозов К.В. и др. Формирование градиентов структуры, фазового состава и дефектной субструктуры в рельсах при дифференцированной закалке // Перспективные материалы. 2014. № 3. С. 40 – 45.
5. Громов В.Е., Морозов К.В., Иванов Ю.Ф., Волков К.В. и др. Формирование градиентов структуры, фазового состава и дефектной субструктуры в дифференцированно закаленных рельсах // Российские нанотехнологии. 2014. Т. 9. № 5-6. С. 59 – 62.
6. Громов В.Е., Волков К.В., Глезер А.М., Иванов Ю.Ф., Морозов К.В. и др. Дислокационная субструктура и внутренние поля напряжений в объемно и дифференцированно закаленных рельсах // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 10. С. 1230 – 1237.
7. Громов В.Е., Волков К.В., Иванов Ю.Ф., Морозов К.В. и др. Формирование дислокационной субструктуры и внутренних полей напряжений в объемно и дифференцированно закаленных рельсах // Наноинженерия. 2014. Т. 33. № 3. С. 22 – 26.
8. Громов В.Е., Юрьев А.Б., Морозов К.В., Волков К.В., Иванов Ю.Ф. Сравнительный анализ структурно-фазовых состояний в рельсах после объемной и дифференцированной закалки // Сталь. 2014. № 7. С. 91 – 95.
9. Морозов К.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Глезер А.М., Батаев В.А. Анализ структурно-фазовых состояний в рельсах, подвергнутых объемной и дифференцированной закалке // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 4. С. 22 – 26.
10. Gromov V.E., Peregudov O.A., Ivanov Yu.F., Morozov K.V., Alsaraeva K.V., Semina O.A. Surface layer structure degradation of rails in prolonged operation // Journal of surface investigation. X-ray, Synchrotron and neutron techniques. 2015. Vol. 9. No. 6. P. 1292 – 1298.
11. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Peregudov O.A., Morozov K.V., Wang X.L., Dai W.B., Ponomareva Yu.V., Semina O.A. Evolution of structure and properties of railhead fillet in long-term operation // Materials and Electronics Engineering. 2015. Vol. 2. No. 4. P. 1 – 4.
12. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Peregudov O.A., Morozov K.V., Yur'ev A.B. Evolution of the structure and phase states of rails in prolonged operation // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. No. 4. P. 254 – 257.
13. Peregudov O.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Morozov K.V., Alsaraeva K.V., Semina O.A. Structure-phase states evolution in rails during a long operation // AIP conference proceedings. 2015. Vol. 1683. No. 020179.
14. Gromov V.E., Morozov K.V., Yur'ev A.B., Peregudov O.A. Fragmentation of the grain structure of quenched rails // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. No. 10. P. 759 – 761.
15. Ivanov Yu.F., Peregudov O.A., Morozov K.V., Gromov V.E., Popova N.A., Nikonenko E.N. Formation Structural Phase Gradients in Rail Steel During Long Term Operation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 112. No. 012038.
16. 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. No. 1. P. 38 – 44.
17. 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. Vol. 1783. No. 020069.
18. 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. Vol. 80. No. 12. P. 1483 – 1488.
19. Peregudov O.A., Gromov V.E., Ivanov Y.F., Morozov K.V., Kononov S.V. Structural and phase states in high-quality rail // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 4. P. 260 – 263.
20. 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. Vol. 2016. No. 4. P. 371 – 374.
21. 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 proper-

- ties of surface layer // Journal of surface investigation. X-ray, Synchrotron and Neytron techniques. 2016. Vol. 10. No. 5. P. 1101 – 1105.
22. Ivanov Y.F., Morozov K.V., Peregudov O.A., Gromov V.E. Degradation of rail-steel structure and properties of the surface layer // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 8. P. 567 – 570.
23. Громов В. Е., Юрьев А.А., Морозов К.В. и др. Эволюция тонкой структуры в поверхностных слоях 100-м дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т. 14. № 2. С. 267 – 273.
24. Громов В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф. и др. Перераспределение атомов углерода в дифференцированно закаленных рельсах при длительной эксплуатации // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 6. С. 56 – 69.
25. Юрьев А.А., Громов В.Е., Морозов К.В. и др. Изменение структуры и фазового состава поверхности 100-м дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 10. С. 826 – 831.
26. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Юрьев А.А. и др. Природа поверхностного упрочнения дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Деформация и разрушение материалов. 2018. № 4. С. 67 – 85.
27. Громов В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф. и др. Анализ механизмов деформационного упрочнения рельсовой стали в процессе длительной эксплуатации // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2017. № 3. С. 76 – 84.
28. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Юрьев А.А. и др. Градиенты структуры и свойств поверхностных слоев дифференцированно закаленных рельсов после длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т. 14. № 3. С. 297 – 305.
29. Юрьев А.А., Громов В.Е., Гришунин В.А. и др. Механизмы разрушения пластинчатого перлита дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2017. Т. 14. № 4. С. 438 – 444.
30. Иванов, Ю.Ф., Юрьев А.А., Громов В.Е. и др. Преобразование карбидной фазы рельсов при длительной эксплуатации // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 2. С. 140 – 148.
31. Громов В. Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф. и др. Эволюция структуры и свойств дифференцированно закаленных рельсов в процессе длительной эксплуатации // Металлофизика и новейшие технологии. 2017. Т. 39. № 12. С. 1599 – 1646.
32. Громов В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф. и др. Трансформация структуры 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов при длительной эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15. № 1. С. 128 – 134.

© 2020 г. В.Е. Громов, В.Е. Кормышев,
О.А. Перегудов, Ю.Ф. Иванов,
Ю.А. Рубанникова
Поступила 24 января 2020 г.