

**Заключение.** Выполнены многоцикловые усталостные испытания до разрушения образцов силумина, подвергнутых электронно-пучковой обработке. Выявлен режим облучения, который способствует многократному (более чем в 3,5 раза) увеличению усталостного ресурса силумина. Установлено, что главной причиной многократного увеличения усталостной долговечности силумина, обработанного импульсным электронным пучком, является формирование в модифицированном приповерхностном слое наноразмерной многофазной структуры.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (проект МД-2920.2015.8) и государственного задания № 3.1496.2014/К.*

### Список литературы

1. Золоторевский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. М.: Издательский Дом МИСиС. 2005. 376 с.
2. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А. и др. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. Минск: «Белорусская наука», 2013. 287 с.
3. Ivanov Yu.F., Koval N.N., Gorbunov S.V., Vorobyov S.V., Konovalov S.V., Gromov V.E. Multicyclic fatigue of stainless steel treated by a high-intensity electron beam: surface layer structure // Rus. Phys. J. 2011. V 54. No 5. P. 575-583.
4. Sizov V.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorob'ev S.V., Konovalov S.V. Fatigue failure of stainless steel after electron-beam treatment // Steel in Translation. 2012. V 42. No 6. P. 486-488.
5. Grishunin V.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Teresov A.D., Konovalov S.V. Evolution of the phase composition and defect substructure of rail steel subjected to high-intensity electron-beam treatment // J. of Surf. Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2013. V 7. No 5. P. 990-995.

### СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ГРАДИЕНТЫ, ФОРМИРУЮЩИЕСЯ В РЕЛЬСАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Громов В.Е.<sup>1</sup>, Морозов К.В.<sup>2</sup>, Иванов Ю.Ф.<sup>3,4</sup>, Перегудов О.А.<sup>1</sup>, Алсараева К.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия,  
[gromov@physics.sibsiu.ru](mailto:gromov@physics.sibsiu.ru)

<sup>2</sup>ОАО «Евраз – объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»,  
Новокузнецк, Россия, [morozov\\_kv75@mail.ru](mailto:morozov_kv75@mail.ru)

<sup>3</sup>Научно-исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия,

<sup>4</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия,  
[yufi55@mail.ru](mailto:yufi55@mail.ru)

**Введение.** В последние годы в отечественной и зарубежной литературе традиционно подробно освещаются вопросы, связанные с износом рельсов при эксплуатации. Вопросы износа и поверхностной прочности являются предметом самого тщательного рассмотрения с точки зрения, как научных исследований, так и опытно конструкторских и технологических разработок. Их роль особенно возрастает для современных высоконагруженных ответственных изделий, подвергающихся воздействию циклических нагрузок.

Увеличение интенсивности движения и грузонапряженности вызывает необходимость дальнейшего повышения надежности и эксплуатационной стойкости рельсов и обу-

славливает высокий уровень требований к ним по твердости, контактно-усталостной прочности, сопротивлению образованию контактно-усталостных дефектов и хрупкому разрушению. Объемная закалка в масле и отпуск является в настоящее время одним из широко распространенных методов термического упрочнения рельсов. Данный способ позволяет получить в закаленных рельсах однородную структуру сорбита или троосто-сорбита закалки и дает основание для выбора оптимального уровня твердости [1-3]. Следует, однако, отметить, что углеродистые стали характеризуются многообразием формирующихся в них структур, механизм образования которых существенным образом зависит от режима термической обработки и определяет поведение материала при эксплуатации [2, 4-6].

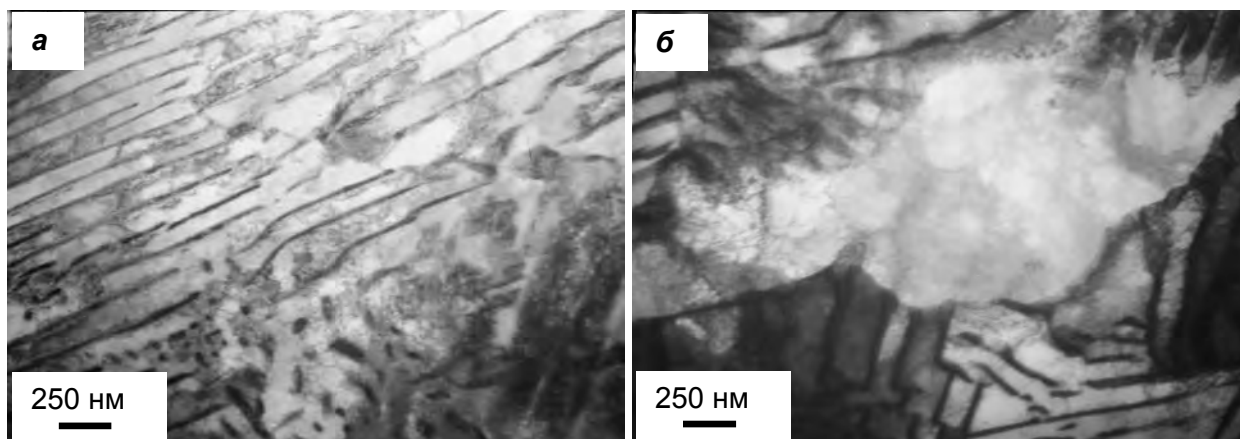
Целью настоящей работы являлось исследование эволюции структуры рельсовой стали Р65, имеющей место при длительной эксплуатации на железной дороге.

**Материал и методика исследования.** В качестве материала исследования использовали образцы рельсовой стали Р65, свойства и элементный состав которой регламентируется ГОСТом Р 51685 – 2000. Образцы рельсовой стали были вырезаны из изделия в исходном состоянии и после эксплуатации на железной дороге (пропущенный тоннаж 1000 млн. т брутто). На всех пробах наблюдается повышенный износ одной из выкружек, указывающий на её преимущественный износ в процессе эксплуатации со стороны подвижного состава. Условно данную выкружку назвали «рабочей», а противоположную соответственно «нерабочей». Анализу подвергали структурно-фазовое состояние рабочей выкружки. Структуру металла исследовали методами металлографии (метод поперечных травленных шлифов, травление осуществляли в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты), сканирующей (фрактография изломов) и просвечивающей (метод тонких фольг) электронной микроскопии. Фольги готовили методом электролитического утонения пластинок, расположенных на поверхности катания, и на расстоянии 2 мм и 10 мм от поверхности катания.

**Результаты исследования и их обсуждение.** В образцах рельсовой стали после наработки 1000 млн. тонн брутто при визуальном осмотре нетравленных шлифов со стороны рабочей выкружки выявлены дугообразные несплошности, проходящие под некоторым углом к поверхности на глубину до 500 мкм. Полости несплошностей заполнены продуктами коррозии. Дорожек окислов, строчек хрупко разрушенных силикатов, пластичных силикатов, а также каких либо дефектов металлургического происхождения по кромкам и на продолжении несплошностей не выявлено, что свидетельствует об образовании этих дефектов в процессе эксплуатации. С поверхности рабочих выкружек рельсовых проб, наблюдаются участки металла со значительно деформированной структурой, зерна ориентированы к поверхности под углом 30 градусов и менее. После травления шлифов микроструктура металла проб представляет сорбит закалки с обрывками ферритной сетки. По мере удаления от поверхности дисперсность перлита незначительно уменьшается, также снижается доля ферритной составляющей. Величина действительного зерна металла рельсовой стали оценивается в соответствии с ГОСТ 5639-82 преимущественно 9-10 номером.

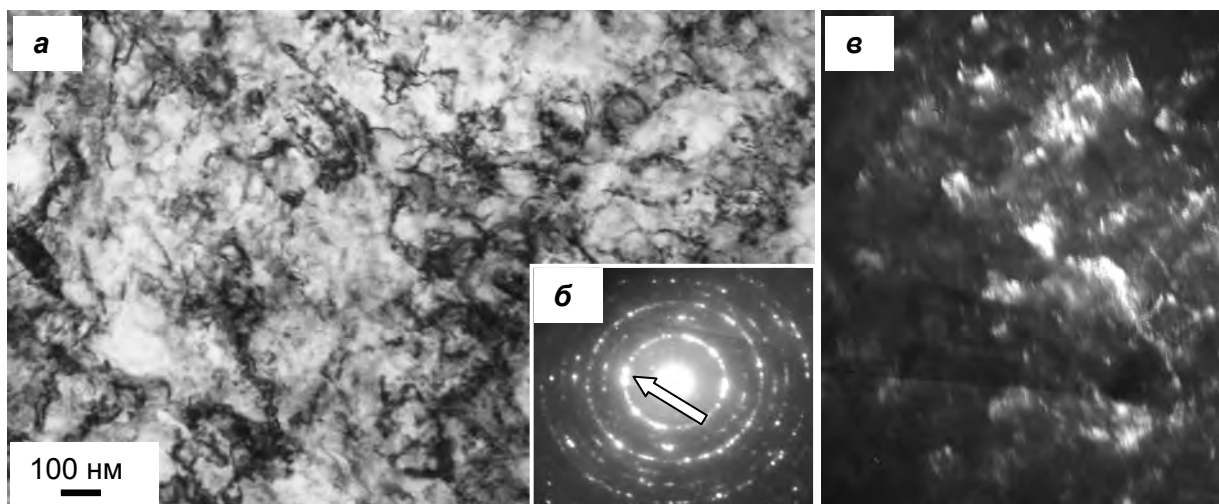
Исследование излома выявило формирование в результате эксплуатации рельсовой стали многослойной структуры: поверхностного слоя толщиной до 20 мкм и переходного слоя толщиной (200-300) мкм, переходящего в основной объем материала. Поверхностный слой характеризуется наличием большого количества микротрещин, микропор и выбоин. Структура переходного слоя характеризуется сравнительно малым (0,5...1 мкм) размером фасеток излома. Размер фасеток излома основного объема стали (4...5) мкм. Важно отметить, что пограничный слой, отделяющий переходный слой от основного объема стали, не содержит дефектов структуры деформационного происхождения (микропоры, микротрещины и т.п.)

Детальным образом фазовый состав и дефектную субструктуру рельсовой стали анализировали методами дифракционной электронной микроскопии тонких фольг на просвет. В результате выполненных исследований по морфологическому признаку были выделены следующие структурные составляющие образцов объема (на расстоянии 30 мм от поверхности катания) рельсовой стали: перлит пластинчатый (рис. 1, а), зерна (области) феррито-карбидной смеси (рис. 1, а) и зерна структурно свободного феррита (рис. 1, б). Основным типом структуры исследуемой стали являются зерна перлита, относительное содержание которых в материале 0,7 (рис. 1, а); относительное содержание зерен феррито-карбидной смеси – 0,2; остальное – зерен структурно свободного феррита.



**Рис. 1.** Электронно-микроскопическое изображение структуры объема рельсовой стали

После эксплуатации структура стали существенным образом изменяется. В поверхностном слое формируется фрагментированная субструктура с размерами фрагментов в пределах 100 нм (рис. 2). Судя по микроэлектроннограммам, полученный слой содержит большое количество включений второй фазы (карбиды и оксиды железа).



**Рис. 2.** Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхностного слоя рельсовой стали, формирующейся в результате эксплуатации; а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в – темное поле, полученное в рефлексе [110]  $\alpha$ -Fe; стрелкой на (б) указан рефлекс, в котором получено темное поле.

На расстоянии 2 мм от поверхности катания структура стали после эксплуатации подобна структуре объема материала. Отличие заключается в степени деформированности материала. А именно, зерна перлита разбиваются, фрагментируются, выявляется большое

количество изгибных экстинкционных контуров; в объеме зерен структурно свободного феррита и зерен феррито-карбидной смеси выявляется повышенная плотность дислокаций.

**Заключение.** Методами оптической, сканирующей и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выполнены исследования фазового состава, дефектной субструктуры поверхностного слоя рельсовой стали Р65, формирующейся в результате эксплуатации на железной дороге (пропущенный тоннаж 1000 млн. т брутто). Показано, что эксплуатация рельса приводит к формированию многослойной структуры. Поверхностный слой толщиной до 20 мкм, характеризуется наличием микропор и микротрещин, имеет многофазную нано- и субмикроструктурную структуру.

Структура слоя, расположенного на расстоянии 2 мм от поверхности катания, по морфологическому признаку подобна структуре объема материала (структуре стали до эксплуатации); представлена зернами перлита преимущественно пластинчатой морфологии, зернами феррито-карбидной смеси и зернами структурно свободного феррита, особенностью которых является повышенная (по сравнению со структурой исходного состояния) плотность дислокаций.

### Список литературы

1. Нестеров Д.К., Разинькова Н.Н., Чернякова Л.Е. и др. // МиТОМ. 1991. №4. С. 45-47.
2. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник / Под ред. М.Л. Бернштейна и А.Г. Рахштадта. Т.3. М.: Металлургия, 1983. С. 113-136.
3. Ворожищев В.И. Состав и технология производства рельсов повышенной работоспособности. Новокузнецк: Изд-во «Новокузнецкий полиграфический комбинат», 2008. 351 с.
4. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977. 236 с.
5. Тушинский Л.И., Батаев А.А., Тихомирова Л.Б. Структура перлита и конструктивная прочность стали. Новосибирск: ВО Наука, 1993. 280 с.
6. Громов В.Е., Юрьев А.Б., Морозов К.В., Иванов Ю.Ф. Микроструктура закаленных рельсов. Новокузнецк: Изд-во «Интер-Кузбасс», 2014. 213 с.

## ТЕРМОУПРУГАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ НА МАТЕРИАЛ

**Сарычев В.Д., Невский С.А., Коновалов С.В., Алсараева К.В., Громов В.Е.**

*Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия*  
[nevskiy\\_sa@physics.sibsiu.ru](mailto:nevskiy_sa@physics.sibsiu.ru)

Напряженное состояние определяет особенности формирования градиентных структур при воздействии концентрированных потоков энергии любой природы, поэтому в области создания математических моделей этих процессов разрабатывается очень много различных подходов [1]. В настоящем подходе будем исходить из того, что при воздействии концентрированных потоков энергии в твердых телах формируются волны напряжений и квазистатическое напряженное состояние, обусловленное неоднородным распределением температур. Для последнего хорошо разработаны аналитические методы [2]. Для динамических задач с учетом отраженных волн и немонотонно заданной температуры на границе известны только численные решения соответствующих задач [3]. Для закрытия этого пробела разработана аналитическая модель решения динамической задачи термоупругости для одномерного конечного слоя, на одной границе которого задана зависи-