

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 548.571:548.4

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.011

## **ФОРМИРОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕЛЬСОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**Наталья Анатольевна Попова<sup>1</sup>, Виктор Евгеньевич Громов<sup>2†</sup>, Юрий Федорович Иванов<sup>3</sup>,  
Михаил Анатольевич Порфирьев<sup>4</sup>, Елена Леонидовна Никоненко<sup>5</sup>,  
Роман Евгеньевич Крюков<sup>6</sup>, Анастасия Николаевна Гостевская<sup>7</sup>**

<sup>1,5</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная, 2, 634003, Томск, Россия

<sup>2, 4, 6, 7</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

<sup>3</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия

<sup>5</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, 634050, Томск, Россия

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

<sup>2</sup> gromov@physics.sibsiu.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343>

<sup>3</sup> yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958>

<sup>4</sup> mporf372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739>

<sup>5</sup> vilatomsk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0396-9541>

<sup>6</sup> rek\_nzrmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3394-7941>

<sup>7</sup> lokon1296@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7328-5444>

**Аннотация.** Для двух рельсов с содержанием углерода 0,74 % масс и 0,91 % масс категорий ДТ350 общего назначения и ДТ40ИК повышенной износостойкости и контактной выносливости после пропущенного тоннажа 1770 млн. тонн (для ДТ350) и 187 млн. тонн ДТ400ИК (1) и 234 млн. тонн ДТ400ИК (2) определен уровень микроскопических внутренних дальнедействующих полей напряжений  $\sigma_0$  на поверхности катания и рабочей выкружке. Для этого методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии проанализированы изгибные экстинкционные контуры, параметры которых использованы при вычислении  $\sigma_0$ . Наличие изгибных контуров экстинкции свидетельствует об изгибе-кручении решетки, характеристикой которого является избыточная плотность дислокаций. Проведено сравнение с другими способами измерения внутренних полей напряжений на мезо- и макро- уровнях (оптические и магнитные методы, рентгеноструктурный анализ), которые являются интегральными. Показано, что параметры изгибных контуров экстинкции являются наиболее информативными и позволяют регулировать локальность измерения  $\sigma_0$ . Отмечены источники внутренних полей напряжений в рельсовых сталях. Выявлено увеличение уровня  $\sigma_0$  в рельсах ДТ400ИК по сравнению с рельсами категории ДТ350. Рост пропущенного тоннажа для рельсов категории ДТ400ИК приводит к росту  $\sigma_0$ , при этом значения внутренних напряжений на поверхности выкружки превышают соответствующие значения на поверхности катания. Обсуждены физические причины наблюдаемых изменений.

**Ключевые слова:** избыточная плотность дислокаций, внутренние поля напряжений, поверхность, рельсы, электронная микроскопия.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания № FEMN-2023-0003.

---

**Для цитирования:** Попова Н.Л., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Порфирьев М.А., Никоненко Е.Л., Крюков Р.Е., Гостевская А.Н. Формирование внутренних полей напряжений на поверхности рельсов при эксплуатации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 2. С. 244–253. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.011.

---

Original article

**FORMATION OF INTERNAL STRESS FIELDS ON THE RAIL SURFACE DURING OPERATION****Natalya A. Popova<sup>1</sup>, Viktor E. Gromov<sup>2†</sup>, Yurii F. Ivanov<sup>3</sup>, Mikhail A. Porfiriev<sup>4</sup>,  
Elena L. Nikonenko<sup>5</sup>, Roman E. Kryukov<sup>6</sup>, Anastasia N. Gostevskaya<sup>7</sup>**<sup>1,5</sup> Tomsk State University of Architecture and Building, sq. Solyanaya, 2, Tomsk, 634003, Russia<sup>2,4,6,7</sup> Siberian State Industrial University, Kirova Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia<sup>3</sup> Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademicheskyy Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia<sup>5</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, ave. Lenin, 30, Tomsk, 634003, Russia<sup>1</sup> natalya-popova-44@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8823-4562><sup>2</sup> gromov@physics.sibsiu.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5147-5343><sup>3</sup> yufi55@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8022-7958><sup>4</sup> mporf372@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3602-5739><sup>5</sup> vilatomsk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0396-9541><sup>6</sup> rek\_nzrmk@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3394-7941><sup>7</sup> lokon1296@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7328-5444>

**Abstract.** For two rails with a carbon content of 0.74 % mass and 0.91 % mass of categories DT350 of general purpose and DT400IK of increased wear resistance and contact endurance after a passed tonnage of 1770 million tons (for DT350) and 187 million tons DT400IK (1) and 234 million tons DT400IK (2) the level of microscopic internal long-range stress fields  $\sigma_o$  on the tread surface and working fillet was determined. For this purpose, the bending extinction contours were analyzed by means of transmission electron diffraction microscopy, the parameters of which were used in calculating  $\sigma_i$ . The presence of excess extinction contours indicates the bending-torsion of the lattice, which is characterized by the excess density of dislocations. A comparison is made with other methods for measuring internal stress fields at the meso- and macro- levels (optical and magnetic methods, X-ray diffraction analysis), which are integral. It is shown that the parameters of the bending extinction contours are the most informative and allow one to control the locality of the measurement  $\sigma_o$ . Sources of internal stress fields in rail steels are noted. An increase in the level of  $\sigma_o$  in D400IK rails in comparison with rails of the DT350 category was revealed. The growth of the passed tonnage for rails of category DT400IK leads to an increase in  $\sigma_o$ , while the values of internal stresses on the fillet surface exceed the corresponding values on the tread surface. The physical causes of the observed changes are discussed.

**Keywords:** excess dislocation density, internal stress fields, surface, rails, electron microscopy.

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state assignment No. FEMN-2023-0003.

**For citation:** Popova, N. A., Gromov, V. E., Ivanov, Yu. F., Porfiriev, M. A., Nikonenko, E. L., Kryukov, R. E. & Gostevskaya, A. N. (2023). Formation of internal stress fields on the rail surface during operation. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(2), 244–253. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.02.011.

**Введение**

Увеличение интенсивности железнодорожного движения и его грузонапряженности вызывает необходимость дальнейшего повышения эксплуатационной стойкости рельсов. Проблема формирования и эволюции структуры и свойств рельсов при длительной эксплуатации представляет комплекс взаимосвязанных научных и технических вопросов. Учитывая, что кинетика процессов формирования дислокационной субструктуры связана с основами теории прочности и пластичности, представляется исключительно важной информацией 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 [1]. 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. Вполне очевидно, что при интенсивных деформационных воздействиях, реализуемых при длительной эксплуатации, могут происходить различные процессы (рекристаллизационные, релаксационные, фа-

зовые переходы, распад и образование фаз, аморфизация и т.д.), приводящие к эволюции структурно-фазовых состояний, сопровождающейся изменением (ухудшением) механических свойств.

10 лет назад в России начато производство длинномерных (100 м) дифференцированно закаленных рельсов общего назначения категории ДТ350, а три года назад – рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости (категория рельсов ДТ400ИК) для эксплуатации в прямых участках пути со скоростями до 200 км/ч и кривых участках без ограничения по грузонапряженности. По данным РЖД в 2020 г. до 75 % изъятий рельсов приходилось при достижении предельного состояния по износу и контактно усталостным дефектам. Эти процессы во многом определяются формированием внутренних полей напряжений [2-4].

Проблема внутренних полей напряжений в металлах и сплавах находится в центре внимания исследователей уже много лет. Это объясняется тем, что внутренние поля напряжений играют важную роль в формировании предела текучести, деформационном упрочнении [5-7] и особенно в зарождении и раскрытии микротрещин. Велика их роль в эволюции дефектной структуры при различных видах термической обработки металлов, сплавов и сталей. Кроме того, внутренние напряжения играют значительную роль при фазовых и структурных превращениях [8-11].

Внутренние напряжения классифицируются, прежде всего, по области их локализации. Таким путем выделяют макро-, мезо- и микронапряжения. Макронапряжения локализованы во всем образце или в значительной части его объема. Мезоскопические внутренние напряжения локализованы в объемах протяженностью от десятков до сотен микрометров. В поликристаллах мезонапряжения локализованы в объемах одного или нескольких зерен или части объема зерна. Микроскопические поля напряжений локализованы в участках в несколько микрометров и меньше [12-15].

Существует несколько способов измерения внутренних напряжений. Амплитуду внутренних напряжений можно измерять оптическими и магнитными методами [16, 17]. Однако эти методы являются интегральными. Область усреднения напряжений с использованием этих методов составляет сантиметры (оценка амплитуды макронапряжений).

Внутренние напряжения можно определять с помощью рентгеноструктурного анализа (измерение напряжений I и II рода). Область ус-

реднения напряжений в этом случае значительно уменьшается и составляет миллиметры, но остается по-прежнему большой. При использовании рентгеноструктурного анализа оценка амплитуды внутренних напряжений выполняется с использованием данных о размытии рентгеновских линий [18, 19] и позволяет проводить оценку амплитуды мезоскопических внутренних напряжений.

Наиболее информативным методом изучения мезо- и микроскопических полей внутренних напряжений к настоящему моменту является дифракционная электронная микроскопия, которая позволяет регулировать локальность измерения внутренних напряжений в широких пределах (от сотен нанометров до сотен микрон) [20-22]. Поскольку в работе использован метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), то в дальнейшем детально будет рассмотрен только этот метод.

Целью настоящей работы является анализ уровня внутренних полей напряжения на поверхности рельсов после эксплуатации.

#### Материалы, методы и методики исследования

В качестве материалов исследований использовались образцы 100-метровых дифференцированно закаленных рельсов категории ДТ350 и ДТ400ИК после эксплуатации. Пропущенный тоннаж для рельсов ДТ350 составляет 1770 млн. тонн брутто и для рельсов ДТ400ИК (1) – 187 млн. тонн на экспериментальном кольце РЖД, а для рельсов ДТ400ИК (2) – 234 млн. тонн на Забайкальской железной дороге (рис.1). Они были изготовлены из сталей Э76ХФ и Э90ХАФ (соответственно для ДТ350 и ДТ400ИК), элементный состав которых регламентируется ГОСТом 51685-243 и ТУ 24.10.75111-298-057576.2017РЖД. Дислокационная субструктура определялась методами просвечивающей электронной микроскопии (прибор JEOL JEM2100F) [20-22].

Внутренние поля напряжений на микроуровне создаются неоднородно распределенными дислокациями разного типа с избыточной плотностью. Причинами возникновения является, прежде всего, деформация соседних зерен.

Наличие избыточной плотности дислокаций инфицируется по наличию изгибных экстинкционных контуров. На рис.2 приведены примеры таких контуров для рельсов ДТ350.



Рис.1. Поперечное сечение головки рельса категории ДТ400ИК (2)

Fig.1. Cross section of a rail head of category DT400IK (2)

Изгибный экстинкционный контур является результатом дифракционного контраста, наблюдаемого на электронно-микроскопическом изображении структуры сильно деформированного кристалла. Это геометрическое место точек, где данное семейство атомных плоскостей остается параллельным самим себе и, следовательно, находится в одинаковом отражающем положении.

Изгиб кристаллической решетки может быть: а) чисто упругим, создаваемым полями напряжений, накопленными из-за несовместности деформации, например, зерен поликристалла [23, 24], матрицы материала и недеформируемыми частицами [25]; б) пластическим, если изгиб создается дислокационными зарядами, т.е. избыточной плотностью дислокаций, локализованной в некотором объеме материала [26], и в) упруго-пластическим, когда в материале присутствует оба источника полей [27, 28].

По наличию в материале изгибных экстинкционных контуров методом электронной микроскопии можно измерить остаточные внутренние (моментные, или дальнедействующие) напряжения. Именно их присутствие приводит к изгибу фольги (что соответствует кривизне-кручению кристаллической решетки), если фольга сохраняет форму пластины [20-22]. Остановимся подробнее на методике измерения внутренних полей напряжений. Процедура измерения величины внутренних моментных (дальнедействующих) напряжений сводится к определению градиента кривизны фольги (кристаллической решетки):

$$\chi = \frac{\partial \varphi}{\partial l}, \quad (1)$$

где  $\partial \varphi = \Delta \varphi$  – изменение ориентировки отражающей плоскости фольги,  $\partial l = \Delta l$  – перемещения изгибного экстинкционного контура.

Если в исследуемом участке фольги имеет место упругий изгиб, то амплитуда внутренних

моментных напряжений может быть определена по следующей формуле [13]:

$$\sigma_{\sigma}^y = m \alpha_c G t \frac{\partial \varphi}{\partial l} = m \alpha_c G \chi, \quad (2)$$

где  $\alpha_c = 1-1,5$  – коэффициент Струнина, рассчитанный для дислокационного ансамбля, составленного из дислокаций одного знака [29, 30];  $t$  – толщина фольги. Если внутренние моментные напряжения созданы пластическим изгибом, то [20-22]:

$$\sigma_{\sigma}^{ns} = m \alpha G d \sqrt{\rho_{\pm}}, \quad (3)$$

где  $\alpha = 0,05-0,60$  – параметр, зависящий от типа дислокационного ансамбля [31, 32],  $\rho_{\pm}$  – избыточная плотность дислокаций. В случае упруго-пластического изгиба следует использовать комбинацию формул (2) и (3). Необходимо отметить, что величина  $\alpha$  в формуле (3) слабо зависит от металлического материала и практически полностью определяется типом сформировавшейся субструктуры.

Избыточная плотность дислокаций  $\rho_{\pm} = \rho_+ + \rho_-$  ( $\rho_+$  и  $\rho_-$  – плотность соответственно положительно и отрицательно заряженных дислокаций) измеряется локально по градиенту разориентировки [20-22]:

$$\rho_{\pm} = \frac{1}{b} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial l} = \frac{\chi}{b}, \quad (4)$$

где  $b$  – вектор Бюргера дислокаций,  $\frac{\partial \varphi}{\partial l}$  – градиент кривизны фольги, то есть кривизна-кручение кристаллической решетки. Величина

$\chi = \frac{\partial \varphi}{\partial l}$  определяется путем смещения экстинкционного контура на величину  $\Delta l$  при контролируемом угле наклона фольги  $\Delta \varphi$  в колонне микроскопа с помощью гониометра. При этом желательно, чтобы вектор действующего отражения был перпендикулярен оси наклона гониометра (ОНГ). В противном случае требуется пересчет, так как плоскость действующего отражения уже не будет содержать ось наклона гониометра. Необходимо отметить, что участок фольги, на котором проводится измерение, не должен содержать на пути перемещения контура границ раздела или разориентировки, то есть изгиб фольги должен быть непрерывным. Специальными опытами установлено, что ширина контура в величинах разориентировок для ГЦК сплавов на основе никеля, меди и железа, а также ОЦК и ГЦК сталей составляет  $\sim 1^\circ$  [13]. Это означает, что при повороте гониометра на величину  $\Delta \varphi \approx 1^\circ$  изгибный экстинкционный

контур смещается на расстояние, равное своей ширине, то есть  $\Delta l \approx l$  (при этом должно выполняться условие  $g \perp \text{ОНГ}$ ). Эта величина ( $\Delta \varphi \approx 1^\circ$ ) в сочетании с шириной контура  $l$  позволяет определить градиент разориентировки.

Для разделения случаев упругого, упруго-пластического и пластического изгибов необходимо сравнить скалярную плотность дислокаций ( $\rho$ ), измеренную в локальном участке вблизи изгибного экстинкционного контура, с избыточной плотностью дислокаций ( $\rho_{\pm}$ ), определяемую по формуле (4), следующим образом:

1) если оказывается  $\rho \geq \rho_{\pm}$ , то изгиб можно считать пластическим. В этом случае амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки  $\chi_{nl}$  определяется по формуле (1) и равна:

$$\chi = \chi_{nl}, \quad (5)$$

а величина  $\rho_{\pm}$  определяется формулой (4). Тогда амплитуда внутренних напряжений, созданных пластическим изгибом, равна:

$$\sigma_{\delta}^{nl} = m\alpha G \sqrt{b\chi}, \quad (6)$$

2) если  $\rho < \rho_{\pm}$ , то изгиб – упруго-пластический, и тогда величина  $\rho_{\pm}$  является условной величиной.

В этом случае производится разделение изгиба кристаллической решетки на пластическую компоненту, для которой  $\rho = \rho'_{\pm}$  и упругую компоненту, для которой  $\rho''_{\pm} = \rho_{\pm} - \rho'_{\pm}$ . Тогда амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки равна:

$$\chi = \chi_{nl} + \chi_{упр}, \quad (7)$$

где  $\chi$  рассчитывается согласно формулы (1),  $\chi_{nl}$  – амплитуда кривизны-кручения при пластическом изгибе-кручении, обеспеченный избыточной плотностью дислокаций  $\rho'_{\pm} = \rho$  (локальные значения), равна:

$$\chi_{nl} = b\rho'_{\pm} = b\rho, \quad (8)$$

и тогда амплитуда упругой составляющей кривизны-кручения кристаллической решетки, используя формулу (7), равна:

$$\chi_{упр} = \chi - \chi_{nl}, \quad (9)$$

В результате амплитуда внутренних моментных (дальнодействующих) напряжений определяется, как:

$$\sigma_{\delta} = \sigma_{\delta}^{nl} + \sigma_{\delta}^{упр}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{\delta}^{nl}$  определяется согласно формулы (6), а  $\sigma_{\delta}^{упр}$  – согласно формулы (2):

$$\sigma_{\delta} = m\alpha G \sqrt{b\chi_{nl}} + m\alpha G t \chi_{упр}. \quad (11)$$

Наконец, если  $\rho = 0$  вблизи контура, то изгиб чисто упругий. В этом случае амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки определяется по формуле (1) и равна:

$$\chi = \chi_{упр}. \quad (12)$$

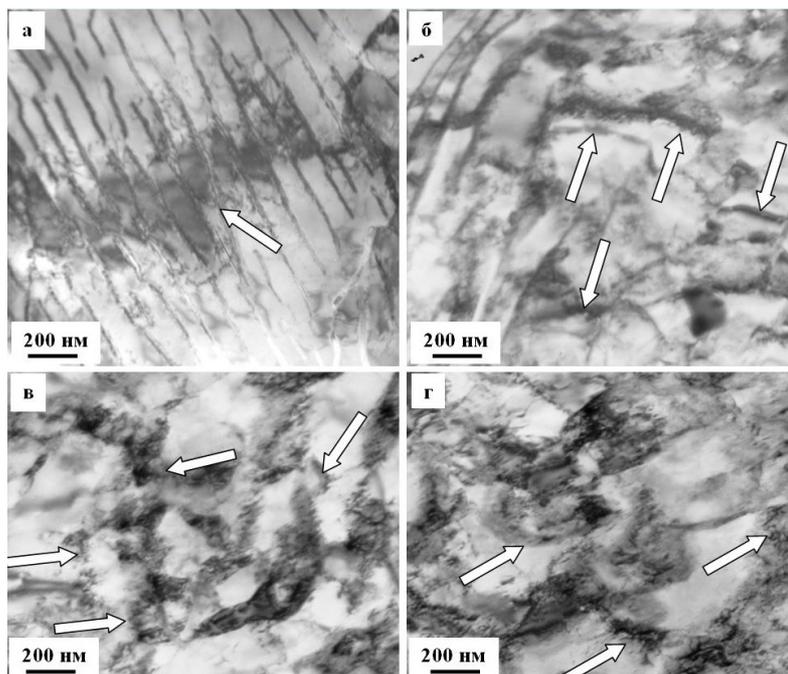
## Результаты и их обсуждение

В работе [13] систематизированы источники внутренних напряжений в ГЦК и ОЦК сталях, и отмечено что ими являются внутрифазные границы раздела (границы зерен и субзерен), межфазные границы раздела, микропоры, микротрещины и т.п.

При рассмотрении и сравнении полей напряжений, создаваемых различными источниками, необходимо иметь в виду, что исследуемые материалы прошли различную термическую обработку, степень деформации, а в формировании наблюдаемых полей приняли участие не только сами источники, но и дислокационная субструктура вокруг них.

В нашем случае источниками кривизны-кручения для рельсов категории ДТ350 являются границы раздела пластин феррита и цемента (рис.2а), границы раздела субзерен (рис.2б), границы раздела частиц глобулярной формы, расположенных на границах (рис.2в) и в объеме (рис.2г) субзерен [1-4].

Приведенный на рис.2а экстинкционный контур плавно пересекает перлитную колонию и совершает небольшие скачки при переходе из одной ферритной пластины в другую, что может быть обусловлено разориентировкой между соседними пластинами феррита. Важно отметить, что контур, начинающийся в феррите, не распространяется в цементитной пластине, а обрывается на ее границе. В цементитной пластине формируется своя система изгибных контуров экстинкции. Оценка избыточной плотности дислокаций и полей напряжений в цементите представляет непростую задачу и не вошла в цели данной работы. В работе [13] отмечено, что амплитуда внутренних напряжений в пластинах цемента в несколько раз выше, чем в ферритной прослойке, поскольку ширина контура в них ~ в 4 раза меньше.



**Рис.2.** ПЭМ изображение изгибных экстинкционных контуров (указаны стрелками) в рельсах категории ДТ350: а – границы раздела феррита и цементита; б – границы раздела субзерен; в – границы раздела частиц глобулярной формы на границах субзерен; г – границы раздела частиц глобулярной формы в объеме субзерен

**Fig.2.** TEM image of bending extinction contours (indicated by arrows) in rails DT350 category: а – interface between ferrite and cementite; б – boundaries between subgrains; в – interfaces between globular particles at the boundaries of subgrains; д – interfaces between globular particles in the volume of subgrains

В соответствии с формулами (1), (4), (11) была проведена оценка кривизны-кручения кристаллических решеток  $\chi$ , избыточной плотности дислокаций  $\rho_{\pm}$  и полей напряжений  $\sigma_{\delta}$  на поверхности катания по центральной оси и радиусу скругления выкружки рельсов категорий ДТ350, ДТ400ИК (1) и ДТ400ИК (2), (Табл.1). В расчетах принималось  $G = 80$  ГПа,  $b = 0,25$  нм,  $a = 0,625$ ,  $m = 2,5$  [12, 13].

**Таблица 1.** Параметры полей напряжений в рельсах

**Table 1.** Parameters of stress fields in rails

Параметр Рельсы	Поверхность		Выкружка	
	$\rho_{\pm} \cdot 10^{-10}$ , см <sup>-2</sup>	$\sigma_{\delta}$ , МПа	$\rho_{\pm} \cdot 10^{-10}$ , см <sup>-2</sup>	$\sigma_{\delta}$ , МПа
ДТ350	3,23	355	3,84	405
ДТ400ИК (1)	5,70	626	6,41	682
ДТ400ИК (2)	8,11	891	9,21	971

Поскольку определенная скалярная плотность дислокаций  $\langle \rho \rangle$  незначительно превы-

шала избыточную  $\rho_{\pm}$ , то это позволяет говорить о смешанном упруго-пластическом характере внутренних полей напряжений [12, 13], а результирующее значение  $\sigma_{\delta}$  будет определяться суммированием (упругой  $\sigma_{\delta}^{уп}$  и  $\sigma_{\delta}^{пл}$  пластической составляющей).

Анализ представленных в таблице результатов оценки не позволяет провести их корректное сравнение. Это может быть обусловлено разным химическим составом рельсов ДТ350 и ДТ400ИК (особенно по содержанию углерода 0,74 % масс и 0,91 % масс, соответственно), режимами дифференцированной закалки, пропущенным тоннажом и, что особенно важно, условиями эксплуатации. Рельсы категории ДТ400ИК после пропущенного тоннажа уже имели вид в поперечном сечении, представленный на рис.1 и были сняты с эксплуатации. Важным представляется, что уровень внутренних полей напряжений во всех случаях на выкружке выше, чем по центральной оси поверхности катания, что свидетельствует о потенциальной возможности зарождения трещин в этих местах.

### Заключение

При определении уровня внутренних микроскопических дальнедействующих полей напряжений в дифференцированно закаленных рельсах категорий ДТ350 и ДТ400ИК из до и заэвтектоидных сталей использован локальный метод просвечивающей электронной микроскопии анализа экстинкционных изгибных контуров. Выявлено различие в значениях кривизны-кручения кристаллической решетки, избыточной плотности дислокаций и уровня полей напряжений поверхности рельсов после различных сроков эксплуатации. При вычислении полей напряжений учтена их пластическая и упругая составляющие. Показано, что на поверхности выкружки уровень внутренних полей напряжений для всех категорий рельсов после эксплуатации выше, что свидетельствует о потенциальном месте зарождения здесь микротрещин. Обсуждены возможные физические причины наблюдаемых различий.

### Список литературы

1. 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. USA: Materials Research Forum LLC, 2021. 193 p.
2. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Yuriev A.A., Kormyshev V.E., Rubannikova Yu.A., Semin A.P., Deformation strengthening mechanisms of rails in extremely long-term operation // Journal of Materials Research and Technology. 2021. V. 11. P. 710–718.
3. Ivanov Y.F., Glezer A.M., Sundeev R.V., Kuznetsov R.V., Gromov V.E., Shliarova Y.A., Semin A.P. Fine structure formation in rails under ultra long-term operation // Materials Letters. 2022. V. 309. P. 131378.
4. Gromov V.E., Ivanov Y.F., Qin R.S., Peregudov O.A., Aksenova K.V., Semina O.A. Degradation of structure and properties of rail surface layer at long-term operation // Materials Science and Technology. 2017. V. 33, N 12. P. 1473–1478.
5. Koneva N.A., Kozlov E.V., Trishkina L.I. Internal field sources, their screening and the flow stress // Materials Science and Engineering: A. 2001. V. 319–321. P. 156–159.
6. Yang M., Ral Yu., Yuan F., Zhu Yu., Wu Back X. Stress Strengthener and Strain Hardening in Gradient Structure // Materials Research Letters. 2016. V. 4, N 3. P. 1–8.
7. Конева Н., Киселева С., Попова Н. Эволюция структуры и внутренние поля напряжений. Аустенитная сталь. Германия, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. 148 с.
8. Смирнов А.Н., Князьков А.Ф., Князьков В.Л. и др. Сварка модулированным током. Структурно-фазовое состояние и поля внутренних напряжений в сварных соединениях конструкционных сталей. М.: Инновационное машиностроение; Кемерово: Сибирская издательская группа, 2017. 328 с.
9. Смирнов А.Н., Князьков А.Ф., Князьков В.Л. и др. Структурно-фазовое состояние, контроль и испытания сварных соединений аустенитных нержавеющей сталей / под ред. А. Н. Смирнова. Кемерово: Сибирская издательская группа, 2021. 245 с.
10. Козлов Э.В., Попова Н.А., Кабанина О.В., Климашин С.И., Громов В.Е. Эволюция фазового состава, дефектной структуры, внутренних напряжений и перераспределение углерода при отпуске литой конструкционной стали. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. 177 с.
11. Гагауз В.П., Козлов Э.В., Данилов В.И., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Структурно-фазовые состояния и механические свойства толстых сварных швов. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2008. 150 с.
12. Тришкина Л.И., Черкасова Т.В., Попова Н.А., Конева Н.А., Громов В.Е., Аксенова К.В. Дислокационный ансамбль: скалярная плотность дислокаций и ее компоненты. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2019. 71 с.
13. Попова Н.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Никоненко Е.Л., Соловьева Ю.В., Никоненко А.В., Шлярова Ю.А. Внутренние напряжения в поликристаллических металлических материалах. Новокузнецк: Полиграфист, 2023. 144 с.
14. Friedel J. Dislocations. Pergamon Press, Oxford, 1964. 643 p.
15. Hirth J., Lothe J., Mura T. Theory of Dislocations. New York. McGraw-Hill/Book reviews, 1972. 599 p.
16. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Книга 1. Пер. с англ. / под ред. А. Кобаяси. М.: Мир, 1990. 616 с.
17. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Книга 2. Пер. с англ. / под ред. А. Кобаяси. М.: Мир, 1990. 552 с.
18. Русаков А.А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977. 479 с.
19. Васильев Д.М. Дифракционные методы исследования структур. С-Пб: ГТУ, 1988. 502 с.

20. Egerton F.R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer international publishing, 2016. 196 p.

21. Kumar C.S.S.R. Transmission electron microscopy. New York: Springer, 2014. 717 p.

22. Carter C.B., Williams D.B. Transmission electron microscopy. Basel: Springer international publishing, 2016. 518 p.

23. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 229 с.

24. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. Москва: Металлургия, 1986. 224 с.

25. Козлов Э.В., Ветер В.В., Попова Н.А., Игнатенко Л.Н. Фрагментированная субструктура и трещинообразование в низколегированной стали // Изв. вузов. Физика. 1994. Т. 37, № 10. С. 73–82.

26. Конева Н.А., Козлов Э.В. Природа субструктурного упрочнения // Изв. вузов. Физика. 1982. Т. 25, № 8. С. 3–14.

27. Козлов Э.В., Ветер В.В., Попова Н.А. и др. Влияние скоростного термоциклического отпуска на субструктуру, фазовый состав и зарождение разрушения стали мартенситного класса // Изв. вузов. Физика. 1994. Т. 37, № 2. С. 36–42.

28. Громов В.Е., Козлов Э.В., Базайкин В.И. и др. Физика и механика волочения и объемной штамповки. Москва: Недра, 1997. 293 с.

29. Струнин Б.Н. О распределение внутренних напряжений при случайном расположении дислокаций // ФТТ. 1967. Т. 9, № 3. С. 805–812.

30. Алексеев А.А., Онищенко Э.В., Струнин Б.Н. Дисперсия внутренних напряжений при случайном расположении дислокаций в кристалле конечных размеров // ФТТ. 1969. Т. 11, № 9. С. 2656–2658.

31. Конева Н.А. Внутренние поля напряжения и их роль в эволюции мезоструктуры // Вопросы материаловедения. 2002. Т. 29, № 1. С. 103–112.

32. Kozlov E.V., Koneva N.A. Internal fields and other contributions to flow stress // Mat. Sci. and Eng. 1997. V. A234–234. P. 982–985.

### **Информация об авторах**

*Н. А. Попова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-учебной лаборатории «Наноматериалы и нанотехнологии» Томского государственного архитектурно-строительного 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.*

*М. А. Порфирьев – научный сотрудник УНИ Сибирского государственного индустриального университета.*

*Е. Л. Никоненко – старший преподаватель ОЕН ШБИП, доцент кафедры «Физика, Химия» Национального исследовательского Томского политехнического университета.*

*Р. Е. Крюков – доктор технических наук, доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства Сибирского государственного индустриального университета.*

*А. Н. Гостевская – аспирант, научный сотрудник лаборатории ЭМуОИ Сибирского государственного индустриального университета.*

### **References**

1. 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. USA, Materials Research Forum LLC. P. 193.

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

3. Ivanov, Y. F., Glezer, A. M., Sundeev, R. V., Kuznetsov, R. V., Gromov, V. E., Shliarova, Y. A. & Semin, A. P. (2022). Fine structure formation in rails under ultra long-term operation. *Materials Letters*, (309), 131378.

4. Gromov, V. E., Ivanov, Y. F., Qin, R. S., Peregudov, O. A., Aksenova, K. V. & Semina, O. A. (2017). Degradation of structure and properties of rail surface layer at long-term operation. *Materials Science and Technology*, 12(33), 1473–1478.

5. Koneva, N. A., Kozlov, E. V. & Trishkina, L. I. (2001). Internal field sources, their screening and the flow stress. *Materials Science and Engineering: A*, (319–321), 156–159.

6. Yang, M., Ral, Yu., Yuan, F., Zhu, Yu., Wu & Back, X. (2016). Stress Strengthening and Strain

- Hardening in Gradient Structure. *Materials Research Letters*, 3(4), 1–8.
7. Koneva, N., Kiseleva, S. & Popova, N. (2017). Structure evolution and internal stress fields. Austenitic steel. Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing. P. 148. (In Russ.).
8. Smirnov, A. N., Knyaz'kov, A. F. & Knyaz'kov, V. L. et al. (2017). Svarka modulirovannym tokom. Strukturno-fazovoye sostoyaniye i polya vnutrennikh napryazheniy v svarnykh soyedineniyakh konstruksionnykh staley. M.: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, Kemerovo: Sibirskaya izdatel'skaya gruppa. P. 328. (In Russ.).
9. Smirnov, A. N., Knyaz'kov, A. F. & Knyaz'kov, V. L. et al. (2021). Strukturno-fazovoye sostoyaniye, kontrol' i ispytaniya svarnykh soyedineniy austenitnykh nerzhavayushchikh staley. Pod red. A. N. Smirnova. Kemerovo: Sibirskaya izdatel'skaya gruppa. P. 245. (In Russ.).
10. Kozlov, E. V., Popova, N. A., Kabanina, O. V., Klimashin, S. I. & Gromov, V. E. (2007). Evolyutsiya fazovogo sostava, defektnoy struktury, vnutrennikh napryazheniy i pereraspredeleniye ugleroda pri otpuske litoi konstruksionnoy stali. Novokuznetsk: Izd-vo SibGIU. P. 177. (In Russ.).
11. Gagauz, V. P., Kozlov, E. V., Danilov, V. I., Ivanov, Yu. F. & Gromov, V. E. (2008). Strukturno-fazovyye sostoyaniya i mekhanicheskiye svoystva tolstykh svarnykh shvov. Novokuznetsk: Izd-vo SibGIU. P. 150. (In Russ.).
12. Trishkina, L. I., Cherkasova, T. V., Popova, N. A., Koneva, N. A., Gromov, V. E. & Aksenova, K. V. (2019). Dislokatsionnyy ansambl': skalyarnaya plotnost' dislokatsiy i yeye komponenty. Novokuznetsk: Sibirskiy gosudarstvennyy industrial'nyy universitet. P. 71. (In Russ.).
13. Popova, N. A., Ivanov, Yu. F., Gromov, V. E., Nikonenko, E. L., Solov'yeva, Yu. V., Nikonenko, A. V. & Shlyarova, Yu. A. (2023). Vnutrenniye napryazheniya v polikristallicheskiykh metallicheskiykh materialakh. Novokuznetsk: Poligrafist. P. 144. (In Russ.).
14. Friedel, J. (1964). Dislocations. Pergamon Press, Oxford. P. 643.
15. Hirth, J., Lothe, J. & Mura, T. (1972). Theory of Dislocations. New York. McGraw-Hill/Book reviews. P. 599.
16. (1990). Eksperimental'naya mekhanika: V 2-kh knigakh: Kniga 1. Per. s angl. Pod red. A. Kobayasi. M.: Mir. P. 616. (In Russ.).
17. (1990). Eksperimental'naya mekhanika: V 2-kh knigakh: Kniga 2. Per. s angl. Pod red. A. Kobayasi. M.: Mir. P. 552. (In Russ.).
18. Rusakov, A. A. (1977). Rentgenografiya metallov. M.: Atomizdat. P. 479. (In Russ.).
19. Vasil'yev, D. M. (1988). Difraktsionnyye metody issledovaniya struktur. S-Pb: GTU. P. 502. (In Russ.).
20. Egerton, F. R. (2016). Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer international publishing. P. 196.
21. Kumar, C. S. S. R. (2014). Transmission electron microscopy. New York: Springer. P. 717.
22. Carter, C. B. & Williams, D. B. (2016). Transmission electron microscopy. Basel: Springer international publishing. P. 518.
23. Panin, V. E., Likhachev, V. A. & Grinyayev, Yu. V. (1985). Strukturnyye urovni deformatsii tverdykh tel. Novosibirsk: Nauka. P. 229. (In Russ.).
24. Rybin, V. V. (1986). Bol'shiye plasticheskiye deformatsii i razrusheniye metallov. Moskva: Metallurgiya. P. 224. (In Russ.).
25. Kozlov, E. V., Veter, V. V., Popova, N. A. & Ignatenko, L. N. (1994). Fragmentirovannaya substruktura i treshchinoobrazovaniye v nizkolegированной stali. *Izv. vuzov. Fizika*, 10(37), 73–82. (In Russ.).
26. Koneva, N. A. & Kozlov, E. V. (1982). Priroda substrukturnogo uprochneniya. *Izv. vuzov. Fizika*, 8(25), 3–14. (In Russ.).
27. Kozlov, E. V., Veter, V. V. & Popova, N. A. et al. (1994). Vliyaniye skorostnogo termotsiklicheskogo otpuska na substrukturu, fazovyy sostav i zarozhdeniye razrusheniya stali martensitnogo klassa. *Izv. vuzov. Fizika*, 2(37), 36–42. (In Russ.).
28. Gromov, V. E., Kozlov, E. V. & Bazaykin, V. I. et al. (1997). Fizika i mekhanika volocheniya i ob'yemnoy shtampovki. Moskva: Nedra. P. 293. (In Russ.).
29. Strunin, B. N. (1967). O raspredeleniye vnutrennikh napryazheniy pri sluchaynom raspolozhenii dislokatsiy. *FTT*, 3(9), 805–812. (In Russ.).
30. Alekseyev, A. A., Onishchenko, E. V. & Strunin, B. N. (1969). Dispersiya vnutrennikh napryazheniy pri sluchaynom raspolozhenii dislokatsiy v kristalle konechnykh razmerov. *FTT*, 9(11), 2656–2658. (In Russ.).
31. Koneva, N. A. (2002). Vnutrenniye polya napryazheniya i ikh rol' v evolyutsii

mezostrukturny. *Voprosy materialovedeniya*, 1(29), 103–112. (In Russ.).

32. Kozlov, E. V. & Koneva, N. A. (1997). Internal fields and other contributions to flow stress. *Mat. Sci. and Eng.*, (A234–234), 982–985.

#### **Information about the authors**

*N. A. Popova – Ph.D., Senior Researcher, Research and Educational Laboratory «Nanomaterials and Nanotechnologies», Tomsk State University of Architecture and Building.*

*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, Chief Researcher of the Institute of High-Current Electronics SB RAS.*

*M. A. Porfiriev – Researcher, Siberian State Industrial University.*

*E. L. Nikonenko – Senior Lecturer of the OEN ShBIP, Associate Professor of the Department of «Physics, Chemistry», National Research Tomsk Polytechnic University.*

*R. E. Kryukov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Materials Science, Foundry and Welding Production, Siberian State Industrial University.*

*A. N. Gostevskaya – Postgraduate Student, Researcher, EM&OI Laboratory, Siberian State Industrial University.*

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

Статья поступила в редакцию 13.03.2023; одобрена после рецензирования 28.03.2023; принята к публикации 03.04.2023.

The article was received by the editorial board on 13 Mar. 23; approved after reviewing 28 Mar. 23; accepted for publication 03 Apr. 23.