Материаловедение / Material science



Оригинальная статья

YJK 669.112:539.4 **DOI** 10.17073/0368-0797-2022-9-654-661 https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2398



Эволюция структуры пластинчатого перлита рельсовой стали при деформации сжатием

К. В. Аксенова¹, В. Е. Громов¹, Ю. Ф. Иванов²,

Е. С. Ващук³, О. А. Перегудов⁴

¹Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

³ Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевск (Россия,

653039, Кемеровская обл. – Кузбасс, Прокопьевск, ул. Ноградская, 32)

⁴ Омский государственный технический университет (Россия, 644050, Омск, пр. Мира, 11)

Аннотация. Приведены результаты анализа эволюции дефектной субструктуры перлита пластинчатой морфологии рельсовой стали Э76ХФ в условиях деформации одноосным сжатием. Показано, что деформационное упрочнение исследуемой стали при пластической деформации одноосным сжатием носит многостадийный характер. Деформация стали сопровождается фрагментацией перлитных зерен, которая усиливается по мере увеличения степени деформации и достигает при є = 50 % примерно 0,4 объема исследуемой фольги. Фрагменты, формирующиеся в пластинах феррита, разделены малоугловыми границами. Средние размеры фрагментов пластин феррита при увеличении степени деформации уменьшаются от 240 нм (ε = 15 %) до 200 нм (ε = 50 %). Выявлена фрагментация пластин цементита. Установлено, что размер фрагментов изменяется в пределах 15 – 20 нм и слабо зависит от степени деформации стали. Разрушение пластин цементита протекает путем их растворения и разрезания подвижными дислокациями. Атомы углерода, перешедшие из кристаллической решетки цементита на дислокации, выносятся в межпластинчатое пространство и формируют частицы третичного цементита, размеры которых составляют 2 – 4 нм. В процессе деформации стали формируется неоднородная дислокационная субструктура, что обусловлено торможением дислокаций частицами цементита. Увеличение степени деформирования сопровождается снижением скалярной и избыточной плотности дислокаций, что может быть обусловлено их уходом в малоугловые границы, а также их аннигиляцией. Установлено, что источниками внутренних полей напряжений являются границы раздела зерен и колоний перлита, пластин цементита в зернах перлита, расположенные в объеме пластин феррита частицы второй фазы.

Ключевые слова: рельсовая сталь, структура, эволюция, дислокации, пластинчатый перлит, пластическая деформация, одноосное сжатие

- Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-32-60001) и стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (проект СП-4517.2021.1).
- *Благодарности:* Авторы выражают благодарность Е.А. Полевому за предоставленные образцы рельсовой стали и Н.А. Поповой за помощь в обсуждении результатов эксперимента.
- Для цитирования: Аксенова К.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф, Ващук Е.С., Перегудов О.А. Эволюция структуры пластинчатого перлита рельсовой стали при деформации сжатием // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 9. С. 654–661. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-654-661

Original article

^e EVOLUTION OF STRUCTURE OF RAIL STEEL LAMELLAR PEARLITE UNDER COMPRESSION DEFORMATION

K. V. Aksenova¹, V. E. Gromov¹, Yu. F. Ivanov²,

E. S. Vashchuk³, O. A. Peregudov⁴

¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)
 ² Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)
 ³ Russian Federation)

³ Prokopyevsk Branch of the Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev (32 Nogradskaya Str., Prokopyevsk, Kemerovo Region – Kuzbass 653039, Russian Federation)
 ⁴ Omsk State Technical University (11 Mira Ave., Omsk 644050, Russian Federation)

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2022, vol. 65, no. 9, pp. 654–661. Aksenova K.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vashchuk E.S., Peregudov O.A. Evolution of structure of rail steel lamellar pearlite under compression ...

Abstract. The article presents the results of analysis of evolution of the defective substructure of rail steel pearlite with lamellar morphology under deformation by uniaxial compression. The strain hardening of the studied steel under such deformation has a multistage character. Deformation of steel is accompanied by fragmentation of pearlite grains, which intensifies as the degree of deformation increases and reaches 0.4 of the studied foil volume at $\varepsilon = 50$ %. Fragments formed in ferrite plates are separated by low-angle boundaries. It was established that the average sizes of ferrite plate fragments decrease from 240 nm ($\varepsilon = 15$ %) to 200 nm ($\varepsilon = 50$ %) with an increase in the deformation degree. Fragmentation of cementite plates was revealed. It was found that the size of the fragments varies within 15 - 20 nm and weakly depends on the degree of steel deformation. Fracture of cementite lamellae, proceeding by their dissolution and cutting by mobile dislocations, was discovered. Carbon atoms that have passed from the crystal lattice of cementite to dislocations are carried out into the interlamellar space and form particles of tertiary cementite, the size of which is 2 - 4 nm. In the process of steel deformation, an inhomogeneous dislocation substructure is formed, which is due to the deceleration of dislocations by cementite particles. It was found that an increase in the deformation degree is accompanied by a decrease in the scalar and excess density of dislocations, which may be due to the escape of dislocations into low-angle boundaries, as well as their annihilation. It was established that the sources of internal stress fields are the interfaces between pearlite grains and colonies, cementite plates in pearlite grains, particles of the second phase located in the volume of ferrite plates.

Keywords: rail steel, structure, evolution, dislocations, lamellar pearlite, plastic deformation, uniaxial compression

- *Funding:* The work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-32-60001) and a scholarship of the President of the Russian Federation for young scientists and postgraduate students carrying out promising research and development in priority areas of modernization of the Russian economy (project SP-4517.2021.1).
- Acknowledgments: The authors express their gratitude to E.A. Polevoi for providing the samples of rail steel and N.A. Popova for help in discussing the experimental results.
- For citation: Aksenova K.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vashchuk E.S., Peregudov O.A. Evolution of structure of rail steel lamellar pearlite under compression deformation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 9, pp. 654–661. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-654-661

Введение

В настоящее время вследствие возрастающей интенсивности и грузонапряженности железнодорожного движения возникает необходимость в дальнейшем повышении эксплуатационной стойкости рельсов [1]. Одним из способов изменения структуры и свойств материалов, характеризующих сопротивление хрупкому разрушению, является деформационное упрочнение [2-5]. Как известно, пластическая деформация это сложный процесс, в результате которого вместе с изменением строения и формы исходного материала меняются его физико-химические и механические свойства. При самых разных видах и режимах пластической деформации в кристаллических материалах с различным типом кристаллической решетки наблюдается фундаментальное явление фрагментации, т. е. деформационное измельчение структуры материалов до порядка 100 – 200 нм [6 – 8].

Рельсы являются важным стратегическим продуктом, поэтому проблема формирования и эволюции структуры и свойств рельсов при пластической деформации является важной научно-технической задачей [9-14]. При интенсивной пластической деформации перлитной стали (0,86 % С) кручением под высоким давлением наблюдается измельчение феррита до размера зерна 10 нм, которое сопровождается полным растворением цементита и увеличением твердости до 11 ГПа [11]. Совместное применение метода испытания на растяжение и рентгеноструктурного анализа [12] показало, что уменьшение межпластинчатого расстояния в 1,5 раза приводит практически к двукратному увеличению критического напряжения сдвига в феррите. В работе [13] показано, что разрушение перлитной структуры в стали 9ХФ при деформации прокаткой и ударном нагружении мало зависит от условий нагружения и начинается с зарождения микротрещин в местах локально высоких напряжений: по межфазным границам α-фаза – цементит. В условиях циклического деформирования растяжением-сжатием в перлитной стали [14] возникает циклическое разупрочнение, причиной которого предположительно является разупрочнение ферритной фазы за счет обратимого движения дислокаций. Таким образом, знание закономерностей формирования структуры и свойств рельсовой стали при различных видах пластической деформации необходимо для управления процессом деформационного упрочнения.

Целью настоящей работы является анализ эволюции структуры и фазового состава перлитной стали при пластической деформации одноосным сжатием.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования использовали образцы рельсовой стали Э76ХФ, свойства и элементный состав которой регламентируются ГОСТ Р 51685 – 2013 [15]. Деформацию одноосным сжатием образцов размерами 9,6×4,7×4,7 мм осуществляли при комнатной температуре на испытательной машине Instron 3369 при скорости нагружения 1,2 мм/мин и автоматической записи нагрузки и размеров образца.

Структуру металла исследовали методами просвечивающей (метод тонких фольг) электронной дифракционной микроскопии (прибор JEOL JEM 2100F). Фольги готовили методом электролитического утонения пластинок, вырезанных электроискровым способом из средней части столбика параллельно поверхности нагружения. Анализировали структурно-фазовое состояние стали, подвергнутой деформированию на 15, 30 и 50 %.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ кривых деформационного упрочнения металлов основывается на учении о стадийности деформационного упрочнения, которое отображает эволюцию дислокационной структуры в процессе деформации [16 – 18]. Образцы стали Э76ХФ при испытании на сжатие не удалось довести до разрушения, поскольку они сплющились из-за того, что исследуемая сталь способна достаточно сильно деформироваться без разрушения. На деформационной кривой рельсовой стали (рис. 1, *a*) можно выделить стадию упругой деформации (*I*) и стадию пластической деформации (*II*) с параболической функциональной зависимостью

$$\sigma = \sigma_0 + \theta \varepsilon^n, \tag{1}$$

где $\sigma_0 = 900 \div 930 \text{ МПа} - предел упругости; <math>\theta(\varepsilon) = \partial \sigma / \partial \varepsilon = f(\sigma) - \kappa o \Rightarrow \phi \phi$ ициент деформационного упрочнения; n < 1 – показатель деформационного упрочнения [16].

После обработки деформационной кривой (рис. 1, *a*) в координатах $\partial \sigma / \partial \varepsilon = f(\sigma)$ выявляется стадийность деформационного упрочнения рельсовой стали (рис. 1, *б*). По точкам перегиба кривой упрочнения, перестроенной в этих координатах, судят о структурных изменениях, происходящих в материале [18]. Для исследуемой стали выделяются следующие стадии: переходная (П), следующая за пределом упругости и демонстрирующая рост коэффициента деформационного упрочнения; стадия *II* с постоянным или почти постоянным высоким упрочнением; стадии *III* и *IV*, где коэффициент деформационного упрочнения уменьшается (зависимость $\sigma = f(\varepsilon)$ на этом участке имеет параболический или близкий к нему характер); стадия *V* с очень низким и постоянным коэффициентом упрочнения.

Из литературных источников [16 - 18] известно, что стадийность пластического течения связана со сменой механизма упрочнения, а значит, с качественно различными дефектными структурами, возникающими на последовательных стадиях кривой деформации. Исследованию подвергались образцы с низким коэффициентом деформационного упрочнения (рис. 1, δ , координаты исследованных образцов на кривой зависимости $\partial\sigma/\partial\varepsilon = f(\sigma)$ обозначены кружком).

Ранее в работах [19, 20] было показано, что в структуре исследуемой стали по морфологическому признаку можно выделить следующие составляющие: зерна перлита пластинчатой морфологии, зерна феррито-карбидной смеси (зерна нерегулярного перлита) и зерна структурно свободного феррита (зерна феррита, в объеме которых нет частиц карбидной фазы). Основным типом структуры исследуемой стали являются зерна перлита, относительное содержание которых в материале 0,7; относительное содержание зерен феррито-карбидной смеси – 0,27; остальное (0,03) – зерна структурно свободного феррита. В объеме всех указанных выше структурных составляющих стали наблюдается дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций или, реже, дислокационных сеток. Скалярная плотность дислокаций в зернах феррита $\langle \rho \rangle = 3,2 \cdot 1010$ см⁻²; в зернах перлита $\langle \rho \rangle = 4,2 \cdot 10^{10}$ см⁻² [19, 20].

При деформации стали одноосным сжатием наблюдается существенное преобразование структуры стали, а именно, фрагментация материала, усиливающаяся по мере увеличения степени деформации. При $\varepsilon = 50 \%$ фрагментированная структура стали занимает 0,37 объема исследуемой фольги. Характерное электронномикроскопическое изображение структуры перлита, формирующейся при данной степени деформации, при-



Рис. 1. Деформационная кривая (*a*) и зависимость коэффициента деформационного упрочнения $\partial \sigma / \partial \varepsilon = f(\sigma)$ (δ) образцов рельсовой стали, подвергнутой нагружению одноосным сжатием. Штриховыми линиями на *a* указан предел упругости материала, на δ – стадии деформационного упрочнения материала. Окружностями обозначены координаты образцов, использованных для исследования структурно-фазового состояния стали

Fig. 1. Deformation curve (a) and dependence of the coefficient of deformation hardening $\partial \sigma / \partial \varepsilon = f(\sigma)$ (δ) of the samples of rail steel subjected to uniaxial compression: dashed lines on a – elastic limit of the material, dashed lines on δ – stages of deformation hardening of the material, circles on δ – coordinates of the samples used to study the structural-phase state of steel



Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение фрагментированной структуры стали при деформации є = 50 % (стрелками указаны малоугловые границы, присутствующие в ферритных пластинах колонии перлита)

Fig. 2. SEM-image of fragmented steel structure of at $\varepsilon = 50$ %: arrows indicate small-angle boundaries in ferrite plates of perlite colony

ведено на рис. 2. Фрагменты, формирующиеся в пластинах феррита, разделены малоугловыми границами (рис. 2, δ , границы указаны стрелками). С увеличением степени деформации средние размеры фрагментов пластин феррита уменьшаются от 240 нм ($\varepsilon = 15$ %) до 200 нм ($\varepsilon = 50$ %).

Также фрагментируются и пластины цементита, размер которых изменяется в пределах 15 – 20 нм и слабо зависит от степени деформации стали. Одновременно с фрагментацией наблюдается растворение и разрезание пластин цементита. Атомы углерода, перешедшие из кристаллической решетки цементита на дислокации, выносятся в межпластинчатое пространство и формируют частицы третичного цементита размерами 2–4 нм.

Деформация зерен перлита сопровождается преобразованием дислокационной субструктуры стали. В структуре исходной стали дислокации распределены квазиравномерно по объему пластин феррита (рис. 3, *a*). Деформация стали приводит к формиро-



Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение дислокационной субструктуры стали в исходном состоянии (*a*) и после деформации сжатием при ε = 50 % (*б*)

Fig. 3. SEM-image of dislocation steel substructure in initial state (a) and after compression deformation at $\varepsilon = 50 \% (\delta)$



Рис. 4. Структура деформированной рельсовой стали (є = 50 %) (стрелками указаны изгибные контуры экстинкции)

Fig. 4. Structure of deformed rail steel at $\varepsilon = 50$ %: arrows indicate bending contours of extinction

ванию скоплений дислокаций вокруг частиц цементита (рис. 3, δ). Увеличение степени деформирования сопровождается снижением скалярной плотности дислокаций, расположенных в объеме фрагментов с 2,1·10¹⁰ см⁻² ($\epsilon = 15$ %) до 0,6·10¹⁰ см⁻² ($\epsilon = 50$ %). Это может быть обусловлено уходом дислокации в малоугловые границы, а также их аннигиляцией. Ранее подобное изменение дислокационной субструктуры в формирующихся при деформации фрагментах отмечалось в работах [21, 22].

Изучение дефектной субструктуры деформированной стали методами просвечивающей электронной микроскопии выявил на электронно-микроскопических изображениях изгибные экстинкционные контуры (рис. 4). Их наличие указывает на изгиб-кручение кристаллической решетки данной области материала, а, следовательно, на внутренние поля напряжений, искривляющие тонкую фольгу и, соответственно, упрочняющие материал [23]. Анализируя изгибные контуры экстинкции, можно указать источники внутренних полей напряжений, т. е. выявить концентраторы напряжений и оценить их относительную величину. В результате выполненных в настоящей работе исследований установлено, что источниками внутренних полей напряжений являются границы раздела зерен и колоний перлита (рис. 4, а), пластин цементита в зернах перлита (рис. 4, б), расположенные в объеме пластин феррита частицы второй фазы (рис. 4, б).

Одной из характеристик кривизны кручения кристаллической решетки является избыточная плотность дислокаций. Следуя методике анализа кривизны кручения кристаллической решетки, впервые изложенной в работе [24], в настоящей работе была проведена оценка величины избыточной плотности дислокаций. Результаты выполненной оценки показали, что избыточная плотность дислокаций снижается с увеличением степени деформации стали подобно величине скалярной плотности дислокаций.

Выводы

В результате исследования эволюции дефектной субструктуры перлита пластинчатой морфологии при одноосном сжатии образцов рельсовой стали Э76ХФ установлено, что деформационное упрочнение носит многостадийный характер. Деформация стали сопровождается фрагментацией перлитных зерен, которая усиливается по мере увеличения степени деформации и достигает при $\varepsilon = 50$ % примерно 0,4 объема исследуемой фольги. С увеличением степени деформации уменьшаются средние размеры фрагментов пластин феррита от 240 нм ($\varepsilon = 15$ %) до 200 нм ($\varepsilon = 50$ %).

Выявлена фрагментация пластин цементита, размеры фрагментов изменяются в пределах 15 – 20 нм и слабо зависят от степени деформации стали. Обнаружено разрушение пластин цементита, протекающее путем их растворения и разрезания подвижными дислокациями. Атомы углерода, перешедшие из кристаллической решетки цементита на дислокации, выносятся в межпластинчатое пространство и формируют частицы третичного цементита, размер которых составляют 2 – 4 нм. В процессе деформации стали формируется неоднородная дислокационная субструктура, что связано с торможением дислокаций частицами цементита. Увеличение степени деформирования сопровождается снижением скалярной и избыточной плотности дислокаций, что может быть обусловлено уходом дислокаций в малоугловые границы, а также их аннигиляцией.

Список литературы References

- Корнева Л.В., Юнин Г.Н., Козырев Н.А., Атконова О.П., Полевой Е.В. Сравнительный анализ показателей качества рельсов ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» и зарубежных производителей // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 12. С. 38–42.
- Zhao Y., Tan Y., Ji X., Xiang Z., He Y., Xiang S. In situ study of cementite deformation and its fracture mechanism in pearlitic steels // Materials Science and Engineering: A. 2018. Vol. 731. P. 93–101. https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.114
- Song R., Ponge D., Raabe D. Mechanical properties of an ultrafine grained C-Mn steel processed by warm deformation and annealing // Acta Materialia. 2005. Vol. 53. No. 18. P. 4881–4792. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.07.009
- Терещенко Н.А., Яковлева И.Л., Зубкова Т.А., Чукин М.В., Копцева Н.В. Структурные уровни деформации перлита в углеродистой стали эвтектоидного состава // Физика металлов и металловедение. 2013. Т. 114. № 5. С. 468–478.
- Calcagnotto M., Adachi Y., Ponge D., Raabe D. Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging // Acta Materialia. 2011. Vol. 59. No. 2. P. 658–670. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.10.002
- Kumar B.R., Raabe D. Tensile deformation characteristics of bulk ultrafine-grained austenitic stainless steel produced by thermal cycling // Scripta Materialia. 2012. Vol. 66. No. 9. P. 634–637. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.01.052
- Skakov M.K., Uazyrkhanova G.K., Popova N.A., Scheffler M. Influence of heat treatment and deformation on the phase-structural state of steel 30CrMnSiA // Key Engineering Materials. 2013. Vol. 531–532. P. 13–17. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.531-532.13
- Zrnik J., Dobatkin S., Raab G., Fujda M., Kraus L. Ultrafine grain structure development in steel with different initial structure by severe plastic deformation // Revista Materia. 2010. Vol. 15. No. 2. P. 240–246. https://doi.org/10.1590/S1517-70762010000200022
- Pan R., Ren R., Chen C., Zhao X. Formation of nanocrystalline structure in pearlitic steels by dry sliding wear // Materials Characterization. 2017. Vol. 132. P. 397–404. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.05.031
- Vinogradov A., Estrin Y. Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation // Progress in Materials Science. 2018. Vol. 95. P. 172–242. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.001
- 11. Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Valiev R.Z., Fecht H.-J. The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion // Acta Materialia. 2003. Vol. 51. No. 18. P. 5555–5570.

https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00419-1

 Yahyaoui H., Sidhom H., Braham C., Baczmanski A. Effect of interlamellar spacing on the elastoplastic behavior of C70 pearlitic steel: Experimental results and self-consistent modeling // Materials & Design. 2014. Vol. 55. P. 888–897.

https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.062

13. Ветер В.В., Жулейкин С.Г., Игнатенко Л.Н., Коваленко В.В., Громов В.Е., Попова Н.А., Козлов Э.В. Градиентные структуры, возникающие при пластической деформации перлитной стали // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2003. Т. 67. № 10. С. 1375–1379.

- Korneva L.V., Yunin G.N., Kozyrev N.A., Atkonova O.P., Polevoi E.V. Comparative analysis of rail product quality indexes of JSC "Novokuznetsk Metallurgical Plant" and foreign manufacturers. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 12, pp. 38–42. (In Russ.).
- Zhao Y., Tan Y., Ji X., Xiang Z., He Y., Xiang S. In situ study of cementite deformation and its fracture mechanism in pearlitic steels. *Materials Science and Engineering: A.* 2018, vol. 731, pp. 93–101. https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.114
- 3. Song R., Ponge D., Raabe D. Mechanical properties of an ultrafine grained C-Mn steel processed by warm deformation and annealing. *Acta Materialia*. 2005, vol. 53, no. 18, pp. 4881–4792. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.07.009
- Tereshchenko N.A., Yakovleva I.L., Zubkova T.A., Chukin M.V., Koptseva N.V. Structure levels of pearlite deformation in carbon steel of eutectoid composition. *The Physics of Metals and Metallography*. 2013, vol. 114, no. 5, pp. 430–439. https://doi.org/10.1134/S0031918X13050116
- Calcagnotto M., Adachi Y., Ponge D., Raabe D. Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging. *Acta Materialia*. 2011, vol. 59, no. 2, pp. 658–670. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.10.002
- Kumar B.R., Raabe D. Tensile deformation characteristics of bulk ultrafine-grained austenitic stainless steel produced by thermal cycling. *Scripta Materialia*. 2012, vol. 66, no. 9, pp. 634–637. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.01.052
- Skakov M.K., Uazyrkhanova G.K., Popova N.A., Scheffler M. Influence of heat treatment and deformation on the phase-structural state of steel 30CrMnSiA. *Key Engineering Materials*. 2013, vol. 531–532, pp. 13–17.

https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.531-532.13

- Zrnik J., Dobatkin S., Raab G., Fujda M., Kraus L. Ultrafine grain structure development in steel with different initial structure by severe plastic deformation. *Revista Materia*. 2010, vol. 15, no. 2, pp. 240–246. https://doi.org/10.1590/S1517-70762010000200022
- Pan R., Ren R., Chen C., Zhao X. Formation of nanocrystalline structure in pearlitic steels by dry sliding wear. *Materials Characterization*. 2017, vol. 132, pp. 397–404. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.05.031
- Vinogradov A., Estrin Y. Analytical and numerical approaches to modelling severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*. 2018, vol. 95, pp. 172–242. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.02.001
- Ivanisenko Yu., Lojkowski W., Valiev R.Z., Fecht H.-J. The mechanism of formation of nanostructure and dissolution of cementite in a pearlitic steel during high pressure torsion. *Acta Materialia*. 2003, vol. 51, no. 18, pp. 5555–5570. https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00419-1
- Yahyaoui H., Sidhom H., Braham C., Baczmanski A. Effect of interlamellar spacing on the elastoplastic behavior of C70 pearlitic steel: Experimental results and self-consistent modeling. *Materials & De*sign. 2014, vol. 55, pp. 888–897. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.062
- Veter V.V., Zhuleikin S.G., Ignatenko L.N., Kovalenko V.V., Gromov V.E., Popova N.A., Kozlov E.V. Gradient structures formed by plastic deformation of perlite steel. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. Fizicheskaya.* 2003, vol. 67, no. 10, pp. 1375–1380.

- Wang Y., Tomota Y., Harjo S., Gong W., Ohmuraa T. In-situ neutron diffraction during tension-compression cyclic deformation of a pearlite steel // Materials Science and Engineering: A. 2016. Vol. 676. P. 522–530. https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.122
- ГОСТ Р 51685 2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. Москва: ФГУП «Стандартинформ», 2013.
- 16. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов / В.И. Трефилов, В.Ф. Моисеев, Э.П. Печковский, И.Д. Горная, А.Д. Васильев. Киев: Наукова думка, 1989. 256 с.
- Kocks U.F., Mesking H. Physics and phenomenology of strainhardening: the FCC case // Progress in Materials Science. 2003. Vol. 48. No. 3. P. 171–273. https://doi.org/10.1016/S0079-6425(02)00003-8
- 18. Подрезов Ю.Н., Фирстов С.А. Два подхода к анализу кривых деформационного упрочнения // Физика и техника высоких давлений. 2006. Т. 16. № 4. С. 37–48.
- 19. Громов В.Е., Юрьев А.Б., Морозов К.В., Иванов Ю.Ф., Алсараева К.В. Структурно-фазовые состояния и дефектная субструктура дифференцированно закаленных рельсов // Известия вузов. Черная мсталлургия. 2014. Т. 57. № 12. С. 29–32.
- Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Morozov K.V., Alsaraeva K.V. Formation of fine structure of differentially hardened rails // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 682. P. 41–45. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.682.41
- 21. Козлов Э.В., Попова Н.А., Конева Н.А. Скалярная плотность дислокаций во фрагментах с разными типами субструктур // Письма о материалах. 2011. Т. 1. № 1. С. 15–18.
- 22. Конева Н.А., Козлов Э.В., Попова Н.А. Влияние размера зерен и фрагментов на плотность дислокаций в металлических материалах // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2010. Т. 7. № 1. С. 64–70.
- 23. Gromov V.E., Yuriev A.B., Morozov K.V., Ivanov Y.F. Microstructure of quenched rails. Cambridge, ISP Ltd, 2016. 153 p.
- 24. Конева Н.А., Козлов Э.В., Тришкина Л.И., Лычагин Д.В. Дальнодействующие поля напряжений, кривизна-кручение кристаллической решетки и стадии пластической деформации. Методы измерений и результаты // Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела. Сб. трудов международной конференции. Томск: ТГУ, 1990. С. 83–93.

- Wang Y., Tomota Y., Harjo S., Gong W., Ohmuraa T. In-situ neutron diffraction during tension-compression cyclic deformation of a pearlite steel. *Materials Science and Engineering: A.* 2016, vol. 676, pp. 522–530. *https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.122*
- **15.** GOST R 51685 2013. Railway rails. General technical conditions. Moscow: Standartinform, 2013. (In Russ.).
- Trefilov V.I., Moiseev V.F., Pechkovskii E.P., Gornaya I.D., Vasil'ev A.D. *Deformation Hardening and Destruction of Polycrystalline Materials*. Kiev: Naukova dumka, 1989, 256 p. (In Russ.).
- Kocks U.F., Mesking H. Physics and phenomenology of strainhardening: the FCC case. *Progress in Materials Science*. 2003, vol. 48, no. 3, pp. 171–273. https://doi.org/10.1016/S0079-6425(02)00003-8
- Podrezov Yu.N., Firstov S.A. Two approaches to analysis of deformation hardening curves. *Fizika i tekhnika vysokikh davlenii*. 2006, vol. 16, no. 4, pp. 37–48. (In Russ.).
- Gromov V.E., Yur'ev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F., Alsaraeva K.V. Structure phase states and defect substructure of differentially hardened rails. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 12, pp. 29–32. (In Russ.).
- Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Morozov K.V., Alsaraeva K.V. Formation of fine structure of differentially hardened rails. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 682, pp. 41–45. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.682.41
- Kozlov E.V., Popova N.A., Koneva N.A. Scalar dislocation density in fragments with different types of substructures. *Pis'ma o materialakh*. 2011, vol. 1, no. 1, pp. 15–18. (In Russ.).
- 22. Koneva N.A., Kozlov E.V., Popova N.A. Effect of grain and fragment size on dislocation density in metallic materials. *Fundamental 'nye* problemy sovremennogo materialovedeniya. 2010, vol. 7, no. 1, pp. 64–70. (In Russ.).
- Gromov V.E., Yuriev A.B., Morozov K.V., Ivanov Y.F. Microstructure of Quenched Rails. Cambridge: ISP Ltd, 2016, 153 p.
- 24. Koneva N.A., Kozlov E.V., Trishkina L.I., Lychagin D.V. Longrange stress fields, curvature-torsion of crystal lattice and stages of plastic deformation. Measurement methods and results. In: New Methods in Physics and Mechanics of Deformable Solids. Proceedings of the Int. Conf. Tomsk: TSU, 1990, pp. 83–93. (In Russ.).

Сведения об авторах / Information about the authors

Крестина Владимировна Аксенова, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет ORCID: 0000-0003-4908-6776 *E-mail:* 19krestik91@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники СО РАН ORCID: 0000-0001-8022-7958 *E-mail:* yufi55@mail.ru

Екатерина Степановна Ващук, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин, Филиал Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева в г. Прокопьевск *E-mail:* vashuk2012@bk.ru

Олег Александрович Перегудов, к.т.н., помощник ректора по молодежной политике, Омский государственный технический университет ORCID: 0000-0001-5154-5498 *E-mail:* olegomgtu@mail.ru Krestina V. Aksenova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University ORCID: 0000-0003-4908-6776 E-mail: 19krestik91@mail.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University ORCID: 0000-0002-5147-5343 E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Yurii F. Ivanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences ORCID: 0000-0001-8022-7958 E-mail: yufi55@mail.ru

Ekaterina S. Vashchuk, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Science, Prokopyevsk Branch of the Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev *E-mail:* vashuk2012@bk.ru

Oleg A. Peregudov, Cand. Sci. (Eng.), Rector's Assistant for Youth Policy, Omsk State Technical University ORCID: 0000-0001-5154-5498 *E-mail:* olegomgtu@mail.ru

Вклад авторов Contribution of the authors		
 К. В. Аксенова – обзор литературы, обсуждение результатов, редактирование текста статьи. В. Е. Громов – формирование концепции работы, научное руководство, написание текста статьи. Ю. Ф. Иванов – проведение электронно-микроскопических исследований, анализ результатов. Е. С. Ващук – подготовка текста статьи, обсуждение результатов. О. А. Перегудов – подготовка образцов для исследований методом просвечивающей электронной микроскопии, обсуждение результатов. 	 <i>K. V. Aksenova</i> – literature review, discussion of the results, editing the text. <i>V. E. Gromov</i> – formation of the concept, scientific guidance, writing the text. <i>Yu. F. Ivanov</i> – conducting electron microscopic studies, analysis of the results. <i>E. S. Vashchuk</i> – writing the text, discussion of the results. <i>O. A. Peregudov</i> – preparation of the samples for research by the method of transmission electron microscopy, discussion of the results. 	

Поступила в редакцию 24.03.2022	Received 24.03.2022	
После доработки 31.03.2022	Revised 31.03.2022	
Принята к публикации 04.04.2022	Accepted 04.04.2022	