

**Оригинальная статья**

УДК 621.791.05:620.179

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-135-141

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНАХ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОЙ СТАЛИ**

© 2024 г. Н. В. Абабков

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (Россия, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28)

**Аннотация.** Методом электронной микроскопии исследовали металлические образцы поврежденных и бывших в эксплуатации фрагментов паропроводов, изготовленных из теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ, после деформации до образования зон устойчивой локализованной макродеформации. Исследовали не эксплуатированные образцы, образцы после эксплуатации без повреждений, а также образцы после разрушения в результате длительной эксплуатации. Для каждого образца был определен фазовый состав (качественный и количественный); рассчитаны следующие структурные параметры: объемные доли структурных составляющих стали; скалярная плотность рдислокаций; избыточная плотность  $\rho_{\pm}$  дислокаций; кривизна-кручение кристаллической решетки  $\chi$ ; амплитуды внутренних напряжений (сдвиговых и дальнедействующих). Все количественные микроструктурные параметры определяли как для каждого структурного компонента стали, так и для образца в целом. Структура всех исследованных образцов металла в зонах устойчивой локализованной макродеформации представлена ферритом и перлитом, при этом для образцов после разрушения в процессе длительной эксплуатации только из фрагментированного и нефрагментированного феррита. Были рассчитаны соотношения  $\rho \geq \rho_{\pm}$ ,  $\chi = \chi_{пл}$ ,  $\sigma_l \geq \sigma_d$ , которые указывают на то, есть ли опасность появления микротрещин. Для образцов без эксплуатации и после эксплуатации без повреждений в зонах устойчивой локализованной макродеформации рассматриваемые условия выполняются, а для образцов после разрушения в результате длительной эксплуатации нет. Выявлено, что при длительной эксплуатации стали происходит изменение фазового состава и тонкой структуры металла, заключающиеся в увеличении содержания феррита и уменьшении количества перлита, а также в росте плотности дислокаций и кривизны-кручения кристаллической решетки. Длительная эксплуатация стали в условиях высоких температур и давлений приводит к постепенному изменению ее свойств и структуры, что может привести к снижению надежности и безопасности эксплуатации паропроводов.

**Ключевые слова:** структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений, плотность дислокаций, зона локализации деформации, длительная эксплуатация, теплоустойчивая сталь

**Благодарности.** Автор выражает признательность Смирнову А.Н., профессору кафедры Технологии машиностроения КузГТУ, Данилову В.И., в.н.с. лаборатории физики прочности ИФПМ СО РАН, Поповой Н.А. и Никоненко Е.Л., сотрудникам кафедры ФХиТМ ТГАСУ за помощь в обсуждении результатов исследований.

**Для цитирования:** Абабков Н.В. Исследование структурно-фазового состояния и внутренних напряжений в зонах локализации деформации образцов из теплоустойчивой стали. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):135–141. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-135-141](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-135-141)

*Original article*

**STUDY OF STRUCTURAL-PHASE STATE AND INTERNAL STRESSES IN ZONES OF DEFORMATION LOCALIZATION OF HEAT-RESISTANT STEEL SAMPLES**

© 2024 N. V. Ababkov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28 Vesennyaya Str., Kemerovo, 650000, Russian Federation)

**Abstract.** A study of metal samples from exploited and damaged sections of steam pipelines made of 0.12C-1Cr-1Mo-IV steel after deformation to the formation of zones of stable localization of deformations by the method of electron microscopy was carried out. Specimens without exploitation, after exploitation, but not damaged, and specimens after exploitation before destruction were investigated. As a result of the studies carried out for each sample, the phase composition was determined (qualitatively and quantitatively), and the following parameters of the fine structure were calculated: volume fractions of structural components of steel, scalar  $\rho$  and excess  $\rho_{\pm}$  dislocation density, curvature-torsion of the crystal lattice  $\chi$ , amplitude of internal stresses (shear stress and long-range stresses). All quantitative parameters of the fine structure are determined both in each structural component of steel, and in general for each sample. The structure of the metal of all specimens after deformation before the formation of zones of stable localization of deformations consists of a ferrite-pearlite mixture, and for specimens after operation before fracture only of unfragmented and fragmented ferrite. Ferrite, which occupies the bulk of the material, is present both unfragmented and fragmented. For all samples, the ratios  $\rho \geq \rho_{\pm}$ ,  $\chi = \chi_{pl}$ ,  $\sigma_L \geq \sigma_d$  were calculated, which indicate whether there is a danger of the initiation of microcracks in metal samples. For specimens without operation and after operation without damage in zones of stable localization of deformations, these conditions are met, and for specimens after operation until destruction they are not met.

**Keywords:** structural-phase state, internal stress fields, dislocation density, deformation localization zone, long-term operation, heat-resistant steel

**Acknowledgements:** author expresses gratitude to Smirnov A.N., professor of the Department of Mechanical Engineering Technology of KuzSTU, Danilov V.I., senior researcher of Laboratory of Strength Physics, Institute of Physics and Applied Mathematics SB RAS, Popova N.A. and Nikonenko E.L., employees of the Department of Physics and Technology of TSASU for their assistance in discussing the research results.

**For citation:** Ababkov N.V. Study of the structural-phase state and internal stresses in zones of localized deformation of samples made of heat-resistant steel. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):135–141. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-135-141](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-135-141)

**Введение**

Обеспечение защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасном производственном объекте является одной из основных задач современной промышленности. Решить эту задачу можно при помощи надежной диагностики и точной оценки остаточного ресурса оборудования. В процессе эксплуатации под действием тяжелых условий энергетического оборудования в металле происходят сложные физико-химические процессы, вызывающие изменение структурно-фазового состояния, зарождение и накопление микродефектов, которые приводят впоследствии к разрушению элементов и узлов оборудования [1; 2].

По официальным данным на начало 2024 г. доля оборудования, выработавшего свой ресурс, составляет 49 %, а для некоторых групп оборуду-

дования может достигать 95 %. При этом количество такого оборудования с каждым годом увеличивается, а наибольшее количество аварий и инцидентов на объектах котлонадзора приходится на Сибирский федеральный округ. По результатам анализа причин аварий и инцидентов, происшедших за последние пять лет, трубопроводы пара и горячей воды остаются одними из самых аварийных объектов с избыточным давлением, несмотря на отсутствие опасных факторов (взрывоопасность, пожароопасность и присутствие токсичных сред) [2].

Анализ основных причин аварий и инцидентов в период 2019 – 2024 гг. показывает, что наличие положительных заключений экспертов по промышленной безопасности (ПБ) не гарантирует безопасность оборудования. Менее 10 % случаев (аварий и инцидентов) связаны с эксплуатацион-

ными дефектами оборудования, а почти 40 % – с низким качеством обслуживания, проверки, диагностики и экспертизы ПБ оборудования [3].

В настоящее время разрабатываются методы неразрушающего контроля, направленные на изучение структурного состояния. Установлены важные зависимости количественных показателей структурно-фазового состояния с параметрами перспективных методов неразрушающего контроля. Разработан ряд критериев для предельных состояний как основного металла, так для и наплавленного металла, а также металла сварных соединений на основе этих зависимостей.

Так как эти критерии связаны с предельным состоянием оборудования, поэтому рассматриваемые параметры нуждаются в уточнении. Кроме того, анализ как структурно-фазового состояния, так и механических свойств металла в энергетическом оборудовании после длительной эксплуатации может повысить точность и достоверность проводимой оценки. Важно установить характерные зоны, предшествующие разрушению или места локализации деформаций [4].

Цель настоящей работы заключается в исследовании структурно-фазового состояния и внутренних напряжений в зонах локализации деформации образцов из теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ.

### Методы и принципы исследования

Для проведения заявленного исследования использовали образцы, взятые из гнутаго участка паропровода перед выпускным клапаном после эксплуатации без разрушения сроком 260000 ч, а также образцы, вырезанные из трубы змеевика конвективного пароперегревателя КПП-1 с разрушением после эксплуатации сроком 263 000 ч. Геометрия образцов соответствовала форме dog-bone размером рабочей области  $40 \times 6 \times 3$  мм. Микроструктуру анализировали с помощью оптического микроскопа Neophot-21, оснащенного цифровой технической видеокамерой UCМOS03100KPA. Механические характеристики измеряли при комнатной температуре на испытательной машине Walter + Bai AG LFM-125 при постоянной скорости на одноосное растяжение. Скорость перемещения подвижного захвата составляла 0,4 мм/мин (квазистатический тест). Одновременно с растяжением методом цифровой корреляции изображений (DIC) [4 – 6] регистрировали картины локализации деформации. Такой метод реализовывали с применением видеокамеры PL-B781F и лазера SNF-xxx-635-30-KB. Для сравнения аналогичные эксперименты проводили на образцах, взятых из труб того же размера, но которые не были в эксплуатации (состояние без эксплуатации) [7; 8].

Были проведены исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии образцов после пластической деформации [9; 10]. В результате исследований для каждого образца был определен фазовый состав (качественный и количественный), а также рассчитаны параметры структуры (объемные доли структурных составляющих стали, скалярная плотность  $\rho$  дислокаций и избыточная плотность  $\rho_{\pm}$  дислокаций, кривизна-кручение кристаллической решетки  $\chi$ , амплитуды внутренних напряжений (сдвиговых и дальнедействующих)) [11; 12]. Все количественные структурные параметры определяли как для каждого структурного компонента стали, так и для каждого образца в целом.

### Основные результаты

Результаты исследования структуры образцов металла в зонах устойчивой локализации деформации показали, что именно на этих участках материала при одноосном растяжении произошли наибольшие изменения. Установлено, что на ранней стадии нагружения формирование подвижных фронтов локализации деформации, связанной с перемещением полос Чернова – Людерса в эксплуатировавшем металле, не происходит, а зоны устойчивой локализации макродеформации возникают задолго до появления видимых шеек разрушения [13 – 16]. Расположение таких зон совпадает с местом, где в последствии происходит разрушение.

#### *Состояние без эксплуатации*

В зонах локализации деформации матрица стали марки 12Х1МФ в состоянии без эксплуатации представлен  $\alpha$ -фазой (твердый раствор углерода и легирующих элементов в  $\alpha$ -Fe с ОЦК кристаллической решеткой). Морфологические компоненты  $\alpha$ -фазы следующие: 5 % перлита и 95 % феррита (70 % фрагментированного феррита) (рис. 1). Дислокационная субструктура между ферритными слоями сетчатая. Вследствие деформации произошло как разрушение цементитных пластин, так и увеличение скалярной плотности дислокаций между ферритными слоями ( $\rho = 3,43 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ), что привело к дальнейшей поляризации дислокационной структуры. Амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки феррита  $\chi = 560 \text{ см}^{-1}$ , избыточная плотность дислокаций  $\rho_{\pm} = 2,24 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , в перлите сохраняется условие  $\rho > \rho_{\pm}$ .

#### *Состояние после эксплуатации без разрушения*

Матрица стали марки 12Х1МФ в состоянии после эксплуатации (260 тыс. ч) без разрушения также как и для состояния без эксплуатации в зонах

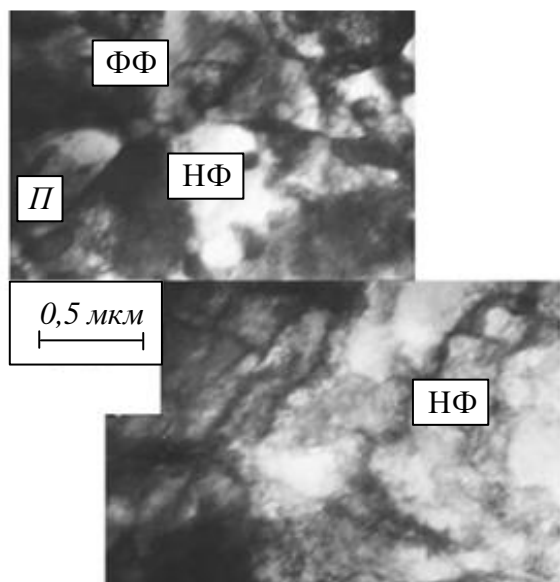


Рис. 1. Теплоустойчивая сталь марки 12X1MF (состояние без эксплуатации; П – зерно перлита; НФ – зерно нефрагментированного феррита; ФФ – зерно фрагментированного феррита)

Fig. 1. Heat-resistant steel grade 12X1MF (condition without operation; П – grain of pearlite; НФ – grain of unfragmented ferrite; ФФ – grain of fragmented ferrite)

локализации деформации представляет собой  $\alpha$ -фазу (твердый раствор углерода и легирующих элементов в  $\alpha$ -Fe с ОЦК кристаллической решеткой). Морфологическими составляющими  $\alpha$ -фазы являются перлит (22 %) и феррит (78 %; 63 % фрагментированного феррита) (рис. 2). В зоне локализованной деформации перлит практически полностью разрушен. Объемная доля цементита в перлитных зернах составляет 4,8 %.

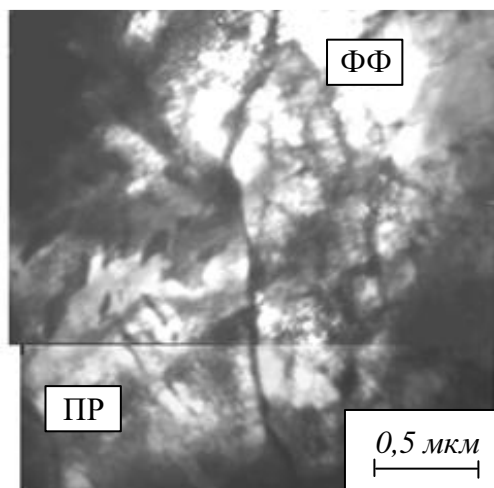


Рис. 2. Теплоустойчивая сталь марки 12X1MF (состояние после длительной эксплуатации (260 тыс. ч) без разрушения; ПР – разрушенный перлит; ФФ – фрагментированный феррит)

Fig. 2. Heat-resistant steel grade 12X1MF (condition after prolonged operation (260 thousand hours) without destruction; ПР – destroyed pearlite; ФФ – fragmented ferrite)

Дислокационная субструктура в прослойках феррита сетчатая. Скалярная плотность дислокаций составляет  $3,25 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Дислокационная структура в перлитных зернах поляризована. Амплитуда кривизны-кручения  $\chi$  составляет  $455 \text{ см}^{-1}$ , избыточная плотность дислокаций  $\rho_{\pm} 1,82 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ,  $\rho > \rho_{\pm}$ . Средняя амплитуда напряжения сдвига  $\sigma_{\text{л}} = 360 \text{ МПа}$ , средняя амплитуда дальнедействующих (локальных) напряжений  $\sigma_{\text{д}} = 270 \text{ МПа}$  ( $\sigma_{\text{л}} > \sigma_{\text{д}}$ ). Это означает, что изгиб-кручение кристаллической решетки феррита в зернах перлита также создает дислокационную структуру и носит чисто пластический характер [17].

*Состояние после эксплуатации и разрушения*

Микроструктура стали марки 12X1MF существенно изменилась после эксплуатации: доля перлитного компонента значительно снизилась, а средний размер перлитных колоний уменьшился в 2 раза. Тенденция снижения содержания перлита в образцах в состоянии после разрушения еще более ярко выражена. Микроструктура стали в этом состоянии представлена смесью феррита с низким содержанием карбидов (рис. 3), объемная доля которого составляет 100 % (95 % фрагментированного феррита).

При количественной оценке таких параметров микроструктуры металла образцов из стали марки 12X1MF как плотность дислокаций (скалярная и избыточная) и амплитуд полей внутренних напряжений (касательных и моментных) (см. таблицу) в зонах локализации деформации условия  $\rho > \rho_{\pm}$  и  $\sigma_{\text{л}} > \sigma_{\text{д}}$  выполняются только для состояния без эксплуатации. В зонах локализации деформации для состояний после эксплуатации (260 тыс. ч) без разрушения и после эксплуатации 263 тыс. ч) и разрушения расчеты не выполняются.

Общей закономерностью формирования зон локализации деформаций для теплоустойчивых сталей является достижение критических значений фрагментированной субструктуры, а выявление зон локализации деформации для оборудования является обоснованным как для вновь вводимого оборудования, так для оборудования, находящегося в процессе длительной эксплуатации [18 – 20].

### Выводы

Установлено, что структура металла всех образцов после деформации до образования зон устойчивой локализованной деформации состоит из феррита и перлита, а для образцов после разрушения в процессе длительной эксплуатации только из фрагментированного и нефрагментированного феррита. Для всех исследованных образцов были рассчитаны соотношения ( $\rho$

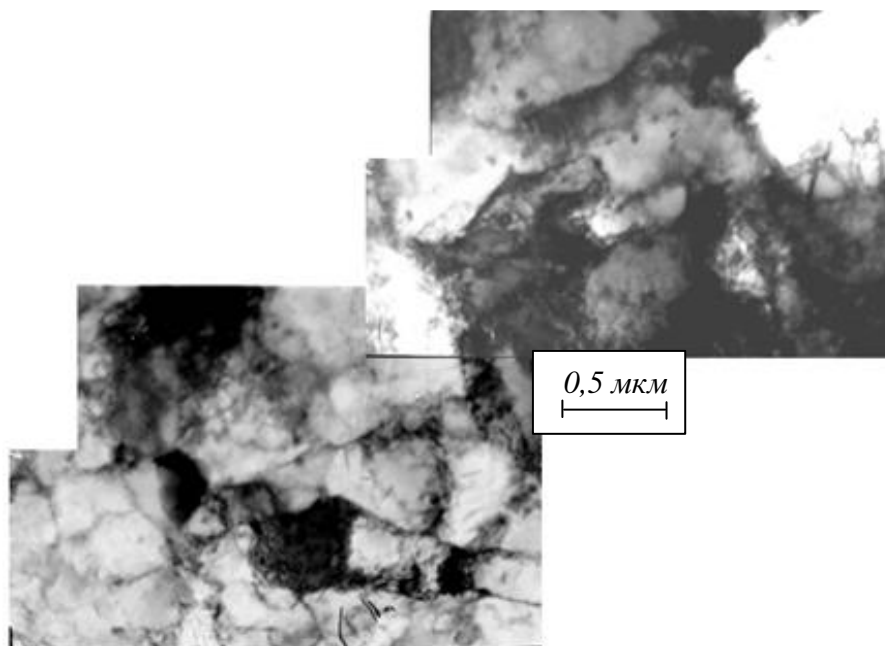


Рис. 3. Теплоустойчивая сталь марки 12X1МФ (образец после длительной эксплуатации до разрушения)  
 Fig. 3. Heat-resistant steel grade 12X1MF (sample after prolonged operation before destruction)

$\geq \rho_{\pm}$ ,  $\chi = \chi_{пл}$ ,  $\sigma_{л} \geq \sigma_{д}$ ) для того, чтобы определить есть ли риск зарождения микротрещин. Эти условия выполняются для образцов без эксплуатации и после нее без повреждений в зонах устойчивой локализованной деформаций, а для образцов после разрушения в процессе длительной эксплуатации нет. Общей закономерностью формирования зон локализации деформаций для теплоустойчивой стали марки 12X1МФ является достижение критических значений фрагментированной субструктуры (60 – 95 %), а выявление зон локализации деформации для оборудования является обоснованным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев В. В. *Деградация диагностики без-опасности*. Москва: Издательский дом «Спектр». 2012:128. EDN: SFDDCN.
2. Багмутов В.П., Белов Е.Г., Божко И.А., Будовских Е.А., Ващук Е.С. и др. Структурно-фазовые состояния перспективных металлических материалов. Новокузнецк: Изд-во НПК. 2009:613. EDN: SNBGKB.
3. Rezinskikh V.F., Grin' E.A. Reliability and safety of thermal power stations in Russia at the present stage: problems and future objectives. *Thermal Engineering*. 2010;57:1–8. <https://doi.org/10.1134/S0040601510010015>
4. Зуев Л. Б., Данилов В.И., Баранникова С.А., Плосков Н.А. О природе упругопластического инварианта деформации. *Журнал технической физики*. 2018;88(6):855–859.
5. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Zuev L.B. On the kinetics of mobile Chernov–Luders band fronts. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1783:020035. <https://doi.org/10.1063/1.4966328>

#### Количественные параметры микроструктуры металла исследованных образцов из теплоустойчивой стали в зоне локализации деформации (метод просвечивающей электронной микроскопии) Quantitative parameters of the metal microstructure of the studied samples of heat-resistant steel in the deformation localization zone (transmission electron microscopy method)

Состояние	Параметры микроструктуры				
	$\rho_{-2}$ см <sup>-2</sup>	$\rho_{\pm, -2}$ см <sup>-2</sup>	$\chi_{-1}$ см <sup>-1</sup>	$\sigma_{л'}$ МПа	$\sigma_{д'}$ МПа
Состояние без эксплуатации	$3,41 \cdot 10^{10}$	$2,24 \cdot 10^{10}$	560	368	298
Состояние после эксплуатации (260 тыс. ч) без разрушения	$3,00 \cdot 10^{10}$	$2,52 \cdot 10^{10}$	630	330	405
Состояние после эксплуатации (263 тыс. ч) и разрушения (на расстоянии 30 мм от трещины)	$2,07 \cdot 10^{10}$	$1,95 \cdot 10^{10}$	572	277	427

6. Gorbatenko V.V., Danilov V.I., Zuev L.B. Elastoplastic transition in material with sharp yield point. *AIP Conference Proceedings*. 2015; 1683:020058. <https://doi.org/10.1063/1.4932748>
7. Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Глинка А.С., Логов А.Б. Акустические и физико-механические показатели теплоустойчивой стали в окрестности трещины. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2011;10:40–45.
8. Ababkov N., Smirnov A., Danilov V., Zuev L., Popova N., Nikonenko E. Structural-phase state, mechanical properties, acoustic and magnetic characteristics in the sustainable deformation localization zones of power equipment made of structural and heat resistant steels. *Metals*. 2021;11(10):1638. <https://doi.org/10.3390/met11101638>
9. Козлов Э.В., Тришкина Л.И., Попова Н.А., Конева Н.А. Место дислокационной физики в многоуровневом подходе к пластической деформации. *Физическая мезомеханика*. 2011;14(3):95–110.
10. Пикеринг Ф.Б. *Физическое материаловедение и разработка сталей*. Москва: Металлургия. 1982:182
11. Смирнов А.Н., Козлов Э.В., Абабков Н.В., Купченко М.В. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 1. Микроскопия и рентгеноструктурный анализ. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2010;4:62–68.
12. Иванов Ю.Ф., Лычагин Д.В., Громов В.Е., Целлермаер В.В., Соснин О.В., Коваленко В.В., Коновалов С.В. Мезоскопическая субструктура и электроимпульсное подавление усталостного разрушения. *Физическая мезомеханика*. 2000;1(3):103–108.
13. Danilov V.I., Orlova D.V., Zuev L.B. On the kinetics of localized plasticity domains emergent at the pre-failure stage of deformation process. *Materials and Design*. 2011;32:1554–1558. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.031>
14. Zuev L.B. Chernov–Luders and Portevin–Le Chatelier deformations in active deformable media of different nature. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017;58(2):328–334. <https://doi.org/10.1134/S0021894417020171>
15. Danilov, V.I., Smirnov A.N., Gorbatenko V.V., Orlova D.V., Danilova L.V. Luders Deformation in Weld Joints. *Steel in Translation*. 2018;48(2):87–92. <https://doi.org/10.3103/S0967091218020031>
16. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020;13(20): 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
17. Утевский Л.М. *Дифракционная электронная микроскопия в металловедении*. Москва: Металлургия. 1973:584.
18. Gromov V.E., Yur'ev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F., Alsaraeva K. V. Structure, phase composition, and defect substructure of differentially quenched rail. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2014;44(12):883–885. <https://doi.org/10.3103/S0967091214120067>
19. Popova N.A., Potekaev A.I., Nikonenko E.L., Klopotov A.A., Bayatanova L.B., Nikonenko A.V., Kislitsin S.B. Phase Composition and Thin Structure of Steel Surface after Plasma Electrolytic Carbonitriding. *Russian Physics Journal*. 2020;62(10):1794–1800. <https://doi.org/10.1007/s11182-020-01908-9>
20. Kozlov E.V., Popova N.A., Pekarskaya E.E., Koneva N.A., Zhdanov A.N. Subgrain structure and internal stress fields in UFG materials: problem of Hall – Petch relation. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;1–2:789–794. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.081>

## REFERENCES

1. Klyuev V.V. *Degradation of safety diagnostics*. Moscow: Izdatel'skii dom «Spektr». 2012:128. EDN: SFDDCN. (In Russ.).
2. Bagmutov V.P., Belov E.G., Bozhko I.A., Budovskikh E.A., Vashchuk E.S. and others . Structural and phase states of promising metallic materials. Novokuznetsk: Izd-vo NPK. 2009:613. EDN: SNBGKB. (In Russ.).
3. Rezinskikh V.F., Grin' E.A. Reliability and safety of thermal power stations in Russia at the present stage: problems and future objectives. *Thermal Engineering*. 2010;57:1–8. <https://doi.org/10.1134/S0040601510010015>
4. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A., Ploskov N.A. On the nature of the elastoplastic invariant of deformation. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2018;88(6):855–859. (In Russ.).
5. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Zuev L.B. On the kinetics of mobile Chernov–Luders band fronts. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1783:020035. <https://doi.org/10.1063/1.4966328>
6. Gorbatenko V.V., Danilov V.I., Zuev L.B. Elastoplastic transition in material with sharp yield point. *AIP Conference Proceedings*. 2015; 1683:020058. <https://doi.org/10.1063/1.4932748>

7. Smirnov A.N., Ababkov N.V., Glinka A.S., Logov A.B. Acoustic and physico-mechanical properties of heat-resistant steel in the vicinity of the crack. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2011;10:40–45. (In Russ.).
8. Ababkov N., Smirnov A., Danilov V., Zuev L., Popova N., Nikonenko E. Structural-phase state, mechanical properties, acoustic and magnetic characteristics in the sustainable deformation localization zones of power equipment made of structural and heat resistant steels. *Metals*. 2021;11(10):1638. <https://doi.org/10.3390/met11101638>
9. Kozlov E.V., Trishkina L.I., Popova N.A., Koneva N.A. The place of dislocation physics in a multi-level approach to plastic deformation. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2011;14(3):95–110. (In Russ.).
10. Pikering F. B. *Physical metallurgy and steel engineering*. Moscow: Metallurgiya. 1982:182. (In Russ.).
11. Smirnov A.N., Kozlov E.V., Ababkov N.V., Kupchenko M.V. Modern methodological support for assessing the metal condition of potentially dangerous equipment. Part 1. Microscopy and X-ray diffraction analysis. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010;4:62–68. (In Russ.).
12. Ivanov Yu.F., Lychagin D.V., Gromov V.E., Tsellermaer V.V., Sosnin O.V., Kovalenko V.V., Konovalov S.V. Mesoscopic substructure and electrical pulse suppression of fatigue failure. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2000;1(3):103–108. (In Russ.).
13. Danilov V.I., Orlova D.V., Zuev L.B. On the kinetics of localized plasticity domains emergent at the pre-failure stage of deformation process. *Materials and Design*. 2011;32:1554–1558. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.031>
14. Zuev L.B. Chernov–Luders and Portevin–Le Chatelier deformations in active deformable media of different nature. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017;58(2):328–334. <https://doi.org/10.1134/S0021894417020171>
15. Danilov, V.I., Smirnov A.N., Gorbatenko V.V., Orlova D.V., Danilova L.V. Luders Deformation in Weld Joints. *Steel in Translation*. 2018;48(2):87–92. <https://doi.org/10.3103/S0967091218020031>
16. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020;13(20): 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
17. Utevskii L. M. *Diffraction electron microscopy in metallography*. Moscow: Metallurgiya. 1973:584. (In Russ.).
18. Gromov V. E., Yur'ev A. B., Morozov K. V., Ivanov Yu. F., Alsaraeva K. V. Structure, phase composition, and defect substructure of differentially quenched rail. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2014;44(12):883–885. <https://doi.org/10.3103/S0967091214120067>
19. Popova, N. A., Potekaev A. I., Nikonenko E. L., Klopotov A. A., Bayatanova L. B., Nikonenko A. V., Kislitsin S. B. Phase Composition and Thin Structure of Steel Surface after Plasma Electrolytic Carbonitriding. *Russian Physics Journal*. 2020;62(10):1794–1800. <https://doi.org/10.1007/s11182-020-01908-9>
20. Kozlov, E. V., Popova N.A., Pekarskaya E.E., Koneva N.A., Zhdanov A.N. Subgrain structure and internal stress fields in UFG materials: problem of Hall–Petch relation. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;1–2:789–794. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.081>

**Сведения об авторе**

**Николай Викторович Абабков**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологий машиностроения, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

**E-mail:** ababkovnv@kuzstu.ru

**ORCID:** 0000-0003-0794-8040

**SPIN-код:** 2309-4988

**Information about the author**

**Nikolai V. Ababkov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

**E-mail:** ababkovnv@kuzstu.ru

**ORCID:** 0000-0003-0794-8040

**SPIN-код:** 2309-4988

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 22.01.2024

После доработки 08.02.2024

Принята к публикации 12.02.2024

Received 22.01.2024

Revised 08.02.2024

Accepted 12.02.2024