

Оригинальная статья

УДК 621.791.05:620.179

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-4(50)-55-62

**ЭФФЕКТ РАВЕНСТВА ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ ОТ УСТОЙЧИВОЙ
ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ ДО РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ
КОНСТРУКЦИОННЫХ И ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ**

© 2024 г. Н. В. Абабков

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

Аннотация. Проблема оценки остаточного ресурса длительно работающих технических устройств опасных производственных объектов является актуальной для технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности. В настоящее время для этих целей используют комплексные подходы, включающие громоздкие расчетные алгоритмы, анализ результатов неразрушающих и разрушающих испытаний, а также металлографию. Оценка ресурса является трудоемким процессом, не всегда обеспечивающим необходимую точность полученных результатов вследствие суммирования разного рода погрешностей (вычисления, оборудование, человеческий фактор). Полученные механические характеристики не в полной мере могут быть применены к оборудованию, которое эксплуатируется длительное время в условиях повышенных температур, так как были определены при комнатной температуре и при относительно высоких скоростях деформации и являются кратковременными. Получены зависимости, которые интерпретируются переходом от кратковременных механических характеристик, определенных при комнатной температуре, к длительным, которые являются характеристиками жаропрочности и более точно описывают поведение металла в процессе длительной эксплуатации в условиях высоких температур и давлений. Выявлены особенности формирования зон устойчивой локализации деформаций для конструкционных и теплоустойчивых сталей с разной длительной прочностью при кратковременных испытаниях. Установлен эффект различия временных интервалов от начала деформации до ее устойчивой локализации и эффект равенства временных интервалов от устойчивой локализации деформации до разрушения образцов с различной длительной прочностью. С одной стороны, эффект различия может быть использован для оценки длительной прочности металла, с другой, эффект равенства применяется для оценки остаточного ресурса длительно работающего энергооборудования.

Ключевые слова: эффект равенства, оценка ресурса, разрушение, механические испытания, зона локализации деформации, конструкционная сталь, теплоустойчивая сталь, длительная прочность

Благодарности: автор выражает признательность Смирнову А.Н., профессору кафедры Технологии машиностроения КузГТУ, Данилову В.И., в.н.с. лаборатории физики прочности ИФПМ СО РАН за помощь в обсуждении результатов исследований.

Для цитирования: Абабков Н.В. Эффект равенства временных интервалов от устойчивой локализации деформации до разрушения образцов из конструкционных и теплоустойчивых сталей. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):55–62. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-55-62](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-55-62)

Original article

EFFECT OF EQUALITY OF TIME INTERVALS FROM SUSTAINABLE LOCALIZATION OF DEFORMATION TO FRACTURE OF SAMPLES FROM STRUCTURAL AND HEAT-RESISTANT STEEL

© 2024 N. V. Ababkov

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

Abstract. The problem of assessing the residual life of long-running technical devices of hazardous production facilities is relevant for technical diagnostics and industrial safety examination. Currently, complex approaches are used for these purposes, including cumbersome calculation algorithms, analysis of the results of non-destructive and destructive tests, as well as metallography. Thus, resource assessment is a labor-intensive process that does not always provide the necessary accuracy of the results obtained due to the summation of various types of errors (calculations, equipment, human factor). The obtained values of mechanical characteristics cannot be fully applied to equipment that is operated for a long time at elevated temperatures, since they were determined at room temperature and at relatively high strain rates and, thus, are short-term. Therefore, dependencies were obtained that are a transition from short-term mechanical characteristics determined at room temperature to long-term mechanical characteristics, which are characteristics of heat resistance and more accurately describe the behavior of the metal during long-term operation under conditions of high temperatures and pressures. The work revealed the features of the formation of zones of stable localization of deformations for structural and heat-resistant steels with different long-term strength during short-term tests. The established effect of differences in time intervals from the onset of deformation to stable localization of deformation and the effect of equality of time intervals from stable localization of deformation to failure of samples with different long-term strength. On the one hand, the difference effect can be used to assess the long-term strength of a metal, on the other hand, the equality effect can be used to assess the residual life of long-term power equipment.

Keywords: equality effect, residual life assessment, destruction, mechanical tests, deformation localization zone, structural steel, heat-resistant steel, long-term strength

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 for their assistance in discussing the research results.

For citation: Ababkov N.V. Effect of equality of time intervals from sustainable localization of deformation to fracture of samples from structural and heat-resistant steel. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):55–62. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4\(50\)-55-62](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-4(50)-55-62)

Введение

В настоящее время необходимо уделять внимание проблемам надежности, долговечности оборудования теплоэнергетического комплекса, эксплуатируемого длительное время, для исключения возможности появления технических, экологических и гуманитарных аварий и катастроф. При этом сложившаяся на протяжении десятилетия экономическая ситуация вынуждает продлять срок службы такого оборудования сверх расчетного [1]. Решение этой проблемы может быть достигнуто путем компромисса по проведению технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности. Техническая реализация должна предусмотреть совершенствова-

ние существующих методик испытаний, а также разработку и развитие новых [2 – 4].

Для оценки состояния трубопроводов применяют стресс-тест, который заключается в выборе отдельных участков, нагружении их до предела текучести и проверке герметичности. Использование такого параметра как предел текучести материала в качестве характеристического слабо обосновано с физической точки зрения, так как имеет косвенное отношение к конструктивной прочности. Анализ картин локализации пластического течения в нагружаемом материале может применяться для уточнения параметров испытания [5 – 8]. Кроме того, необходима информация о характере локализации деформации в материа-

лах теплоэнергетического оборудования после длительной эксплуатации.

Проблема оценки остаточного ресурса технических устройств опасных производственных объектов после длительной эксплуатации – это другая не менее важная задача технического диагностирования и экспертизы промышленной безопасности. Для этого в настоящее время применяются комбинированные подходы, в которые входят трудоемкие расчетные алгоритмы, результаты испытаний неразрушающими и разрушающими методами контроля, а также оптической металлографии [9 – 11]. Оценка остаточного ресурса – это процесс трудоемкий и не всегда обеспечивающий необходимую точность результатов из-за суммы погрешностей разного рода (вычислений, оборудования, человеческого фактора и другие). Подход, предложенный в настоящей работе, имеет перспективы для решения обозначенной проблемы.

Цель настоящей работы заключается в выявлении особенностей формирования зон устойчивой локализации деформаций для конструкционных и теплоустойчивых сталей с разной длительной прочностью при кратковременных испытаниях.

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на образцах, вырезанных из длительно работающих элементов теплоэнергетических установок: водоопускная труба фронтального экрана в состоянии поставки без эксплуатации, после эксплуатации без разрушения в течение 220 000 ч и после эксплуатации в течение 240 000 ч до разрушения, материал – сталь марки 20; гнутый участок паропровода перед выхлопным клапаном в состоянии поставки без эксплуатации, после эксплуатации без разрушения в течение 262 000 ч и после эксплуатации в течение 265 000 ч до разрушения, материал – сталь марки 12Х1МФ. Химический состав исследованных сталей приведен в табл. 1.

Механические характеристики измеряли на испытательной машине Walter + Bai AG LFM-125 [12 – 15]. Испытание заключалось в одноосном растяжении с постоянной скоростью перемещения подвижного захвата 0,4 мм/мин при комнатной

температуре на образцах с формой dog-bone и размерами рабочей части 40 × 6 × 2 мм (рис. 1).

Процесс растяжения образцов сопровождался регистрацией картин локализации деформации с использованием метода цифровой корреляции изображений (DIC) [16], реализованного комплектом видеочамер PL-B781F и при освещении лазером SNF-xxx-635-30-KB [17; 18].

Результаты исследований

Анализ результатов механических испытаний образцов из стали марки 20 показал, что длительная эксплуатация привела к уменьшению пластичности стали более чем в два раза с $22 \pm 1,8$ до $9,7 \pm 1,2$ % (рис. 2, а), а также к значительному изменению вида диаграммы напряжение – деформация. Прочность металла образцов после длительной эксплуатации по отношению к состоянию без эксплуатации увеличилась (рис. 2, б). Время от начала испытания до локализации деформации от состояния без эксплуатации к разрушенному уменьшилось. Для образцов из стали марки 12Х1МФ показатели прочности остались на одном уровне (рис. 2, в), тогда как пластичность уменьшилась от состояния без эксплуатации к состоянию после длительной эксплуатации с $30 \pm 1,9$ до $22 \pm 1,1$ % (рис. 2, в).

Описание процесса растяжения образцов с учетом локализации деформации проводили путем расчета деформационных показателей: доля деформации при локализации от всей деформации материала до разрушения a_1 и при локализации до начала падающей части кривой нагружения a_2 [19]:

$$a_1 = \frac{t_{loc}}{t_{crac}} = \frac{\varepsilon_{loc}}{\delta}; \quad (1)$$

$$a_2 = \frac{t_{loc}}{t_B} = \frac{\varepsilon_{loc}}{\varepsilon_B}, \quad (2)$$

где t_{loc} и ε_{loc} – время и деформация, соответствующие локализации деформации; t_B и ε_B – время и деформация, соответствующие максимально-напряжению σ_B ; t_{crac} и δ – время и деформация, соответствующие разрушению образца.

Т а б л и ц а 1

Химический состав исследованных сталей

Table 1. Chemical composition of the studied steels

Марка стали	Содержание элементов, % (по массе)									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P	Va	Fe
20	0,17 – 0,24	0,17 – 0,37	0,35 – 0,65	до 0,25	до 0,25	до 0,25	до 0,04	до 0,035	до 0,08	~98
12Х1МФ	0,08 – 0,15	0,17 – 0,37	0,4 – 0,7	0,9 – 1,2	до 0,3	0,25 – 0,35	до 0,025	до 0,03	0,15 – 0,3	~96

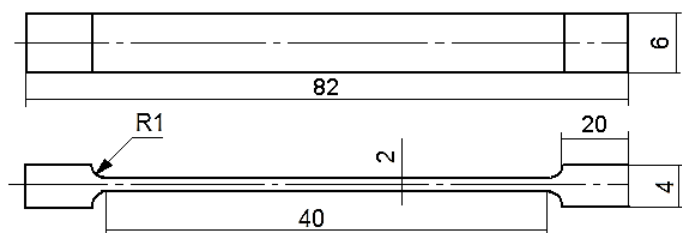


Рис. 1. Эскиз исследованных образцов
Fig. 1. Sketch of the studied samples

Для образцов из стали марки 20 в состоянии после эксплуатации без разрушения (220 000 ч) установлено уменьшение параметра a_2 до 0,471 (на 40 %) (рис. 3, а). Для образцов из стали марки 12Х1МФ показатели a_1 и a_2 для состояний без эксплуатации и после эксплуатации без разрушения значительно не отличаются, тогда как для состояния после эксплуатации и разрушения значения a_1 и a_2 уменьшились (рис. 3, б).

Ранее полученные механические характеристики не в полной мере можно было применять к оборудованию, которое эксплуатируется длительное время в условиях повышенных температур (320 и 560 – 585 °С для стали марок 20 и 12Х1МФ) и давлений (1,6 и 14 МПа для стали марок 20 и 12Х1МФ), так как были определены при комнатной температуре и при относительно

высоких скоростях деформации и являются кратковременными [20 – 22].

Отношение $\sigma_{0,2}/\delta_k$ выбрано в качестве условной характеристики сопротивляемости материала разрушению [23 – 24], а обработка экспериментальных данных в координатах $\sigma_{д.п.} - \sigma_{0,2}/\delta_k$ подтвердила такую закономерность для стали марки 12Х1МФ и температур испытания (560, 580 и 600 °С) на длительную прочность:

$$\sigma_{д.п.}^{560} = 5,3047 \ln \left(\frac{\sigma_{0,2}^{20}}{\delta^{20}} \right) - 9,3387 ; R^2 = 0,9725 ; (3)$$

$$\sigma_{д.п.}^{580} = 6,6035 \ln \left(\frac{\sigma_{0,2}^{20}}{\delta^{20}} \right) - 7,0086 ; R^2 = 0,9748 (4)$$

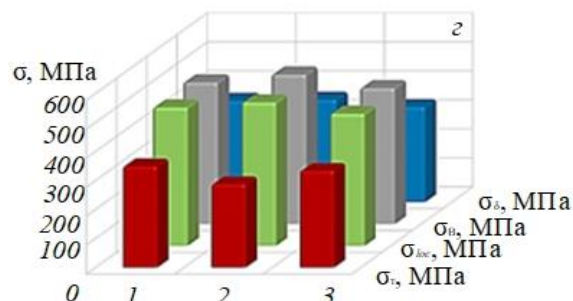
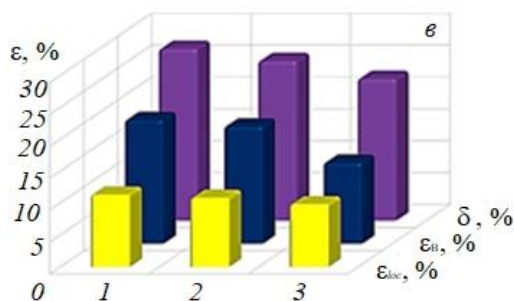
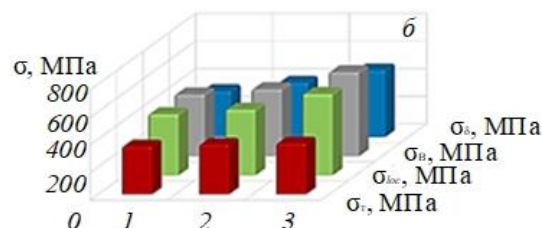
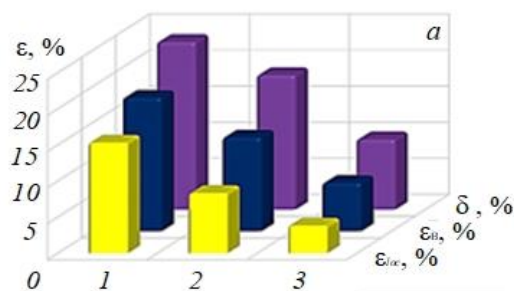


Рис. 2. Результаты механических испытаний образцов из стали марок 20 (а, б) и 12Х1МФ (в, г):

1 – состояние поставки без эксплуатации; 2 – после эксплуатации без разрушения (220 000 и 262 000 ч для стали марок 20 и 12Х1МФ); 3 – после эксплуатации и разрушения (240 000 и 265 000 ч для стали марок 20 и 12Х1МФ)

Fig. 2. The results of mechanical tests of steel samples of grades 20 (а, б) and 12Х1МФ (в, г):

1 – the state of delivery without operation; 2 – after operation without destruction (220,000 and 262,000 hours for steel grades 20 and 12Х1МФ); 3 – after operation and destruction (240,000 and 265 000 h for steel grades 20 and 12Х1МФ)

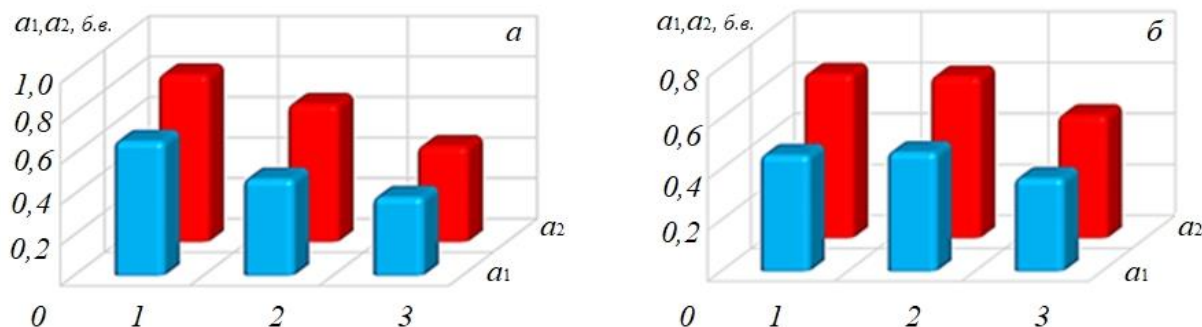


Рис. 3. Деформационные показатели образцов из стали марок 20 (а) и 12Х1МФ (б):

1 – состояние поставки без эксплуатации; 2 – после эксплуатации без разрушения (220 000 и 262 000 ч для стали марок 20 и 12Х1МФ); 3 – после эксплуатации и разрушения (240 000 и 265 000 ч для стали марок 20 и 12Х1МФ)

Fig. 3. Deformation parameters of samples made of structural (а) and 0.12C-1Cr-1Mo-1V steels (б):

1 – initial, without operation; 2 – after operation without destruction (220,000 and 262,000 hours for steel grades 20 and 12X1MF); 3 – after operation and destruction (240,000 and 265 000 h for steel grades 20 and 12X1MF)

$$\sigma_{д.п.}^{600} = 194,11 \frac{\sigma_{0,2}^{20}}{\delta_{20}^{20}} - 127,24; R^2 = 0,9126. \quad (5)$$

Полученные зависимости (3) – (5) являются переходом от кратковременных механических характеристик, определенных при комнатной температуре, к длительным механическим характеристикам, которые являются характеристиками жаропрочности и более точно описывают поведение металла в процессе длительной эксплуатации в условиях высоких температур и давлений.

На основе ранее полученных результатов исследования микроструктуры методом просвечивающей электронной микроскопии и измерения характеристик методов неразрушающего контроля [25] было сделано совмещение диаграмм

напряжения – деформация для образцов в различных состояниях (поставка, без эксплуатации и после эксплуатации без разрушения) с общим началом нагружения (рис. 4).

В результате совмещения диаграмм было выявлено, что временные промежутки от начала нагружения до устойчивой локализации деформации не равны ($t_{loc1} = 115 \text{ с} \neq t_{loc2} = 920 \text{ с}$). В то же время оказались равными временные промежутки от устойчивой локализации деформации до разрушения образцов ($t_{crac1} - t_{loc1} = 385 \text{ с} = t_{crac2} - t_{loc2} = 400 \text{ с}$) для различных состояний (поставка без эксплуатации и после эксплуатации без разрушения (220 000 ч)).

Показано, что этап достижения устойчивой локализации деформации является важным с точки зрения возможности применения для оценки работоспособности и прогнозирования остаточного ресурса технического устройства.

Выводы

Обнаружен эффект, выявленный при устойчивой локализации деформации образцов из конструкционных и теплоустойчивых сталей с разной длительной прочностью, заключающийся в различии временных интервалов (от 113 до 922 с) от начала деформации до устойчивой локализации деформации и равенстве временных интервалов (400 с) от устойчивой локализации деформации до разрушения. Выявленный эффект различия временных интервалов от начала деформации до ее устойчивой локализации и эффект равенства временных интервалов от устойчивой локализации деформации до разрушения образцов с различной длительной прочностью. С одной стороны, эффект различия имеет потенциал применения для оценки длительной прочности исследуемого металла, с другой стороны, эффект равенства используется для оценки работоспособности и прогнозирования остаточного ресурса энергооборудования.

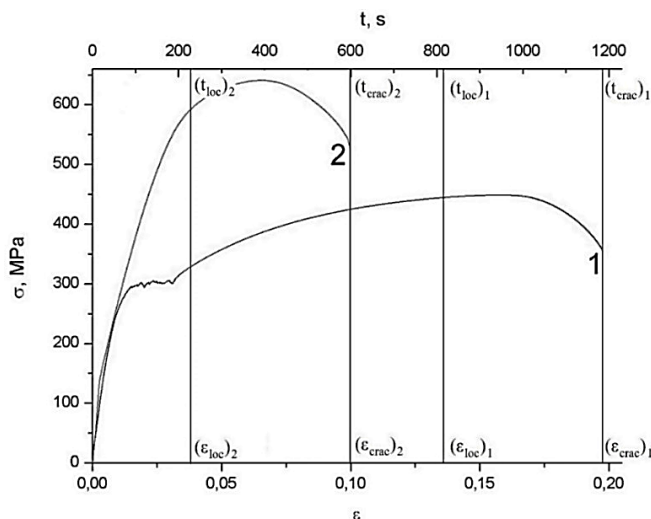


Рис. 4. Диаграммы напряжение – деформация для испытанных образцов из стали марки 20 в различных состояниях: 1 и 2 – поставка без эксплуатации и после эксплуатации без разрушения (220 000 ч)

Fig. 4. Stress – strain diagrams for tested steel samples of grade 20 in various states:

1 and 2 – delivery without operation and after operation without destruction (220,000 h)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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>
2. Ключев В.В. *Деградация диагностики безопасности*. Москва: Издательский дом «Спектр». 2012:128. EDN: SFDDCN.
3. Багмутов В.П., Белов Е.Г., Божко И.А., Будовских Е.А., Ващук Е.С и др. *Структурно-фазовые состояния перспективных металлических материалов: Коллективная монография*: под ред. В.Е. Громова. Новокузнецк: Изд-во НПК. 2009:613. EDN: SNBGKB.
4. Березина Т.Г., Бугай Н.В., Трунин И.И. *Диагностирование и прогнозирование долговечности металла теплоэнергетических установок*. Киев: Техника. 1991:118.
5. 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. <http://dx.doi.org/10.21883/JTF.2018.06.46016.2542>
6. 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>
7. 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>
8. 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(3):1554–1558. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.031>
9. Muravev V. V., Lenkov S. V., Tapkov K. A. In-Production Nondestructive Testing of Internal Stresses in Rails Using Acoustoelasticity Method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019;55(1):8–14. <https://doi.org/10.1134/S1061830919010078>
10. 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.
11. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Petrov K.V. Connection between the properties of 0.4Cr steel bar stock and the speed of bulk and rayleigh waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017;53(8):560–567. <https://doi.org/10.1134/S1061830917080046>
12. Smirnov A.N., Ozhiganov E.A., Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Murav'ev V.V. The dependence of local deformations and internal stress fields on welding technique for grade VSt3sp structural steel: I. The influence of welding technique on the mechanical characteristics and acoustic emission parameters of grade VSt3sp steel. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51(11):705–712. <https://doi.org/10.1134/S1061830915110066>
13. 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>
14. Zuev L. B. Autowave mechanics of plastic flow in solids. *Physics of Wave Phenomena*. 2012;20(3):166–173. <https://doi.org/10.3103/S1541308X12030028>
15. Danilov V. I., Barannikova S. A., Zuev L. B. Localized Strain Autowaves at the Initial Stage of Plastic Flow in Single Crystals. *Technical Physics*. 2003;48(11):1429–1435. <https://doi.org/10.1134/1.1626775>
16. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Orlova D.V., Danilova L.V., Smirnov A.N. Luders Deformation in Weld Joints. *Steel in Translation*. 2018;48(2):87–92. <https://doi.org/10.3103/S0967091218020031>
17. 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;3(1):103–108.
18. 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>
19. Ababkov N.V. Study of localized deformation zones by nondestructive testing methods in structural and heat-resistant steels. *AIP Conference Proceedings* 2020;2315:040001. <https://doi.org/10.1063/5.0036641>
20. Крутасова Е.И. *Надежность металла энергетического оборудования*. Москва: Энергоиздат. 1981:237.
21. Куманин В.И., Ковалева Л.А., Алексеев С.В. *Долговечность металла в условиях ползучести*. Москва: Металлургия. 1988: 224.
22. Бугай Н.В., Шкляр М.И. *Неразрушающий контроль металла теплоэнергетических установок*. Москва: Энергия. 1978: 177 с.

23. Антикайн П.А., Зыков А.К. *Изготовление объектов котлонадзора. Справочное издание*. Москва: Металлургия. 1980:328.
24. Ковпак V. I. Operational creep of materials for steam pipes and extension of service lives of heat electric power plants. *Проблемы прочности*. 1998;3:56–61.
25. 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. Muravev V.V., Lenkov S.V., Tapkov K.A. In-Production Nondestructive Testing of Internal Stresses in Rails Using Acoustoelasticity Method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019;55(1):8–14. <https://doi.org/10.1134/S1061830919010078>
10. 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.).
11. Murav'ev V. V., Murav'eva O. V., Petrov K. V. Connection between the properties of 0.4Cr steel bar stock and the speed of bulk and rayleigh waves. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2017;53(8):560–567. <https://doi.org/10.1134/S1061830917080046>

REFERENCES

1. 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>
2. Klyuev V.V. *Degradation of safety diagnostics*. Moscow: Izdatel'skii dom «Spektr». 2012:128. EDN: SFDDCN. (In Russ.).
3. Bagmutov V.P., Belov E.G., Bozhko I.A., Budovskikh E.A., Vashchuk E.S i dr. *Structural and phase states of promising metallic materials: A collective monograph*: edited by V.E. Gromov. Novokuznetsk: Izd-vo NPK. 2009:613. EDN: SNBGKB. (In Russ.).
4. Berezina T.G., Bugai N.V., Trunin I.I. *Diagnostics and forecasting of metal durability of thermal power plants*. Kyiv: Tekhnika. 1991:118. (In Russ.).
5. 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.). <http://dx.doi.org/10.21883/JTF.2018.06.46016.2542>
6. 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>
7. 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>
8. 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(3):1554–1558. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.031>
12. Smirnov A.N., Ozhiganov E.A., Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Murav'ev V.V. The dependence of local deformations and internal stress fields on welding technique for grade VSt3sp structural steel: I. The influence of welding technique on the mechanical characteristics and acoustic emission parameters of grade VSt3sp steel. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015;51(11):705–712. <https://doi.org/10.1134/S1061830915110066>
13. 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>
14. Zuev L. B. Autowave mechanics of plastic flow in solids. *Physics of Wave Phenomena*. 2012;20(3):166–173. <https://doi.org/10.3103/S1541308X12030028>
15. Danilov V. I., Barannikova S. A., Zuev L. B. Localized Strain Autowaves at the Initial Stage of Plastic Flow in Single Crystals. *Technical Physics*. 2003;48(11):1429–1435. <https://doi.org/10.1134/1.1626775>
16. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Orlova D.V., Danilova L.V., Smirnov A.N. Luders Deformation in Weld Joints. *Steel in Translation*. 2018;48(2):87–92. <https://doi.org/10.3103/S0967091218020031>
17. 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;3(1):103–108. (In Russ.).
18. 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>
19. Ababkov N.V. Study of localized deformation zones by nondestructive testing methods in structural and heat-resistant steels. *AIP Conference Proceedings* 2020;2315:040001. <https://doi.org/10.1063/5.0036641>
 20. Krutasova E.I. *Reliability of metal power equipment*. Moscow: Energoizdat. 1981:237. (In Russ.).
 21. Kumanin V.I., Kovaleva L.A., Alekseev S.V. *Durability of metal in creep conditions*. Moscow: Metallurgiya. 1988:224. (In Russ.).
 22. Bugai N.V., Shklyarov M.I. *Non-destructive testing of metal of thermal power plants*. Moscow: Energiya. 1978:177. (In Russ.).
 23. Antikain P.A., Zykov A.K. *Production of boiler inspection facilities. Reference edition*. Moscow: Metallurgiya. 1980:328. (In Russ.).
 24. Kovpak V. I. Operational creep of materials for steam pipes and extension of service lives of heat electric power plants. *Problemy prochnosti*. 1998;3:56–61.
 25. 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 equip-

ment made of structural and heat resistant steels. *Metals*. 2021;11(10):1638. <https://doi.org/10.3390/met11101638>

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

Поступила в редакцию 19.02.2024

После доработки 12.04.2024

Принята к публикации 22.04.2024

Received 19.02.2024

Revised 12.04.2024

Accepted 22.04.2024