

Оригинальная статья

УДК 621.791.05:620.179

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-2(48)-85-93

АНАЛИЗ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И ПОЛЕЙ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РАССТОЯНИИ ОТ ЗОН ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОЙ СТАЛИ

© 2024 г. Н. В. Абабков

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

Аннотация. Выполнен анализ различий структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений в зонах локализации деформации и на расстоянии 1 мм от нее для образцов из теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ. Исследование микроструктуры образцов осуществляли методом просвечивающей электронной микроскопии на тонких фольгах. Показано, что структура металла всех исследованных участков образцов после деформации до образования зон устойчивой локализации деформаций состоит из феррита и перлита. Занимающий основную часть объема материала феррит присутствует как не фрагментированный, так и фрагментированный. Выявлены отличия в структурно-фазовом состоянии в металле образцов из стали марки 12Х1МФ в зонах устойчивой локализации деформации и на расстоянии от нее. Установленные различия заключаются как в разном процентном соотношении морфологических составляющих микроструктуры (феррита и перлита), в том числе в содержании фрагментированной и не фрагментированной дислокационной субструктуры, так и в количественных показателях (скалярной и избыточной плотности дислокаций, кривизны-кручения кристаллической решетки, амплитуды полей внутренних сдвиговых и дальнедействующих напряжений). Установлено, что после кратковременного испытания до достижения устойчивой локализации деформации не весь объем металла образца имеет одинаковую микроструктуру. Установленные различия структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений в зонах локализации деформации и на расстоянии 1 мм от нее для образцов из теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ свидетельствуют о том, что именно в зонах локализации деформации возникновение микротрещин имеет наибольшую вероятность.

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

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

Для цитирования: Абабков Н.В. Анализ структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений на расстоянии от зоны локализации деформации для образцов из теплоустойчивой стали. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;2(48):85–93. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-85-93](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-85-93)

Original article

ANALYSIS OF STRUCTURAL-PHASE STATE AND INTERNAL STRESS FIELDS AT A DISTANCE FROM THE ZONE OF DEFORMATION LOCALIZATION FOR SPECIMENS MADE OF HEAT-RESISTANT STEEL

© 2024 N. V. Ababkov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28 Vesennaya str., Kemerovo, Kemerovo region – Kuzbass, 650000, Russia)

Abstract. The analysis of differences in the structural-phase state and internal stress fields in the deformation localization zones and at a distance of 1 mm from it for samples made of heat-resistant steel grade 12X1MF is performed. The microstructure of the samples was studied by transmission electron microscopy on thin foils. It is shown that the metal structure of all the studied sections of the samples after deformation before the formation of zones of stable localization of deformations consists of ferrite and perlite. Ferrite, which occupies the main part of the volume of the material, is present both non-fragmented and fragmented. Differences in the structural and phase state in the metal of 12X1MF steel samples in the zones of stable localization of deformation and at a distance from it were revealed. The established differences are both in the different percentage of morphological components of the microstructure (ferrite and perlite), including the content of fragmented and non-fragmented dislocation substructure, and in quantitative indicators (scalar and excessive dislocation density, curvature-torsion of the crystal lattice, amplitudes of the fields of internal shear and long-range stresses). It was found that after a short-term test until stable localization of deformation is achieved, not the entire metal volume of the sample has the same microstructure. The established differences in the structural-phase state and internal stress fields in the deformation localization zones and at a distance of 1 mm from it for samples made of heat-resistant steel grade 12X1MF indicate that it is in the deformation localization zones that the occurrence of microcracks is most likely.

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

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. Analysis of structural-phase state and internal stress fields at a distance from the zone of deformation localization for specimens made of heat-resistant steel. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;2(48):85–93. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-85-93](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-85-93)

Введение

Обеспечение надежности материалов различных конструкций остается актуальной проблемой в настоящее время [1; 2]. В последние годы эта проблема становится все более актуальной в связи с сокращением срока службы конструкций из-за изменения структуры и свойств материала в процессе эксплуатации. В следствие этого необходимо совершенствовать методики по продлению ресурса при длительной эксплуатации. Решение этой проблемы требует глубокого изучения закономерностей накопления повреждений и выявления главных механизмов разрушения. Необходимость оценки вероятности разрушения и установление связей между статистически-

ми свойствами материала и механизмом разрушения связаны также с тем, что деградация структуры металла в процессе длительной эксплуатации увеличивает риск преждевременного разрушения конструкций. Процесс зарождения и накопления дефектов может быть интенсифицирован при необратимом изменении структуры материала в процессе длительной эксплуатации.

Безопасная эксплуатация металлоконструкций основана на сохранении комплекса механических свойств материала на протяжении всего срока эксплуатации. Тем не менее механические свойства имеют тенденцию к деградации от действующих напряжений [3 – 6]; коррозионной среды [7]; циклического нагружения [8]; оста-

точных напряжений [9]; температуры [10 – 13]; дефектов, появляющихся в процессе длительной эксплуатации [14 – 16]. При этом как изменению микроструктурных параметров, так и накоплению дефектов и внутренних напряжений, оказывающих существенное влияние на упрочнение и растрескивание материала в процессе эксплуатации, уделяется мало внимания.

Целью настоящей работы является исследование и сопоставление качественных и количественных показателей структурно-фазового состояния, а также полей внутренних напряжений стали марки 12Х1МФ после одноосного растяжения до стабильной локализации деформации, в зоне локализации деформации и на расстоянии от нее.

Материалы и экспериментальные процедуры

Исследование проводили на образцах стали марки 12Х1МФ после длительной эксплуатации (260 000 ч) и испытаний на одноосное растяжение [17 – 22] непосредственно в зоне локализации деформации и на расстоянии 1 мм от нее. Химический состав (ГОСТ 20072 – 74) стали марки 12Х1МФ следующий: 0,08 – 1,15 % С; 0,15 – 0,30 % V; 0,17 – 0,37 % Si; менее 0,20 % Cu; 0,25 – 0,35 % Mo; 0,40 – 0,70 % Mn; менее 0,30 % Ni; 0,90 – 1,20 % Cr; менее 0,025 % P; менее 0,025 % S; остальное Fe.

Структуру и фазовый состав стали исследовали методом просвечивающей дифракционной электронной микроскопии тонких фольг на электронном микроскопе ЭМ-125 с ускоряющим напряжением 125 кВ. Рабочее увеличение колонны микроскопа составляло 25000х. В результате исследования для каждого образца была проведена классификация морфологических особенностей микроструктуры, определен состав фаз матрицы стали и перечень присутствующих фаз и их локализация, а также рассчитаны следующие микроструктурные параметры: объемная доля структурных составляющих стали P_V ; плотность распределения и объемная доля карбидных частиц; скалярная ρ и избыточная ρ_{\pm} плотности дислокаций; кривизна-кручение кристаллической решетки χ ; амплитуда полей внутренних напряжений σ . Все количественные микроструктурные параметры измеряли как для каждого структурного компонента стали, так и для каждого образца в целом. Все полученные данные подвергали статистической обработке.

Фазовый анализ проводили по изображениям, идентифицированным по микродифракционным картинкам и темнопольным изображениям, полученным с помощью соответствующих отражателей. Линейный размер и скалярную плотность дисло-

каций определяли методом секущих по стандартным методикам. Избыточную плотность дислокаций $\rho_{\pm} = \rho_+ - \rho_-$ (где ρ_+ и ρ_- – плотности положительно и отрицательно заряженных дислокаций) определяли с использованием ориентационного градиента (или градиента кристаллической решетки кривизна-кручение χ), измеренного локально [23]. Кривизну-кручение кристаллической решетки χ определяли наличием в материале изгибных экстинкционных контуров [24]. Внутренние напряжения σ были установлены двух видов: сдвиговые напряжения (дислокационные «лес») σ_L – поля напряжений, созданные дислокационными микроструктурами [25; 26]; дальнедействующие напряжения σ_d – моментные (локальные) напряжения, создаваемые в местах с избыточной плотностью дислокаций в материале ρ_{\pm} ($\rho_{\pm} = \rho_+ - \rho_- \neq 0$) [27 – 30].

Результаты и обсуждение

Ранее было исследовано влияние исходного состояния на структурно-фазовое состояние и внутренние напряжения в зонах локализации деформации образцов из теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ [31]. Было установлено, что морфологическими составляющими α -фазы являются перлит и феррит (рис. 1). Объемная доля перлита и феррита составляет 20 и 80 %. Перлит практически полностью разрушен в зоне локализованной деформации (рис. 1). Объемная доля цементита в зернах перлита составляет 4,8 %.

Феррит присутствует в не фрагментированном и фрагментированном видах (рис. 1). Объемные доли не фрагментированного и фрагментированного феррита составляют 10 и 70 %. Не фрагментированный феррит представлен в структуре феррито-карбидной смесью, причем частицы карбида $Me_{23}C_6$ находятся внутри зерен феррита. В зернах не фрагментированного феррита размер частиц в среднем составляет 38 нм, объемная доля карбидных частиц в зернах не фрагментированного феррита – 0,35 %.

Дислокационная субструктура поляризована и имеет сетчатый тип в зернах нефрагментированного феррита. Среднее значение скалярной плотности дислокаций составляет $2,48 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$; амплитуда кривизны-кручения – 535 см^{-1} ; избыточная плотность дислокаций – $2,14 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($\rho > \rho_{\pm}$). Средняя амплитуда напряжения сдвига σ_L составляет 315 МПа; средняя амплитуда дальнедействующих (локальных) напряжений σ_d – 290 МПа ($\sigma_L > \sigma_d$). В зернах не фрагментированного феррита изгиб-кручение кристаллической решетки обусловлен дислокационной субструктурой и имеет пластический характер, как и

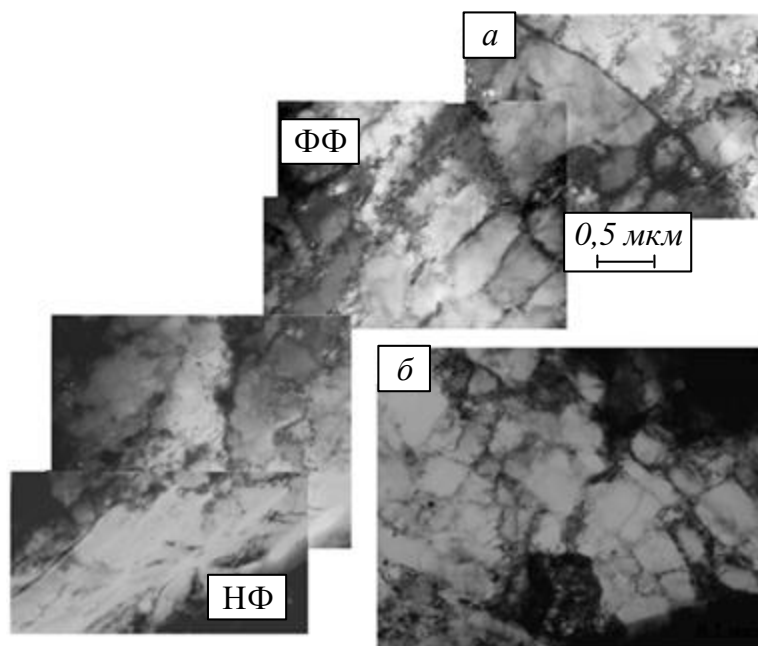


Рис. 1. Изображение структуры образцов из стали марки 12Х1МФ после длительной эксплуатации:
 а – фрагментированный феррит с анизотропными фрагментами (ФФ) и не фрагментированный феррит (НФ);
 б – фрагментированный феррит с изотропными фрагментами

Fig. 1. Image of the structure of 12X1MF steel samples after long-term operation:
 а – fragmented ferrite with anisotropic fragments and unfragmented ferrite; б – fragmented ferrite with isotropic fragments

в зернах перлита. В зернах фрагментированного феррита присутствуют как анизотропные (рис. 1, а), так и изотропные (рис. 1, б) фрагменты. Границы фрагментов четкие. Дислокации, которые образуют сетчатую субструктуру, находятся внутри фрагментов.

Во фрагментированном феррите обнаружены частицы карбида $Me_{23}C_6$, которые располагаются как на границах фрагментов, так и внутри. Частицы, присутствующие внутри фрагментов на дислокациях, имеют округлую форму. Средний размер этих частиц 24 нм, а объемная доля составляет 0,30 %. Средний размер частиц, расположенных на границах фрагментов составляет 32 нм, а объемная доля – 1,68 %.

Дислокационная субструктура внутри фрагментов состоит из дислокационных сеток, как и в нефрагментированном феррите. Скалярная плотность дислокаций составляет $2,60 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Таким образом, скалярная плотность дислокаций имеет тенденцию к уменьшению внутри фрагментов; увеличивается поляризация дислокационной структуры. Амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки во фрагментах увеличивается до 900 см^{-1} . Избыточная плотность дислокаций, определенная по формуле $\rho_{\pm} = \chi/b$ (где b – вектор Бюргера), составляет $3,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и значительно превышает скалярную плотность дислокаций. Из этого следует, что изгиб-кручение кристаллической решетки α -фазы носит упруго-пластический характер ($\sigma_d = \sigma_d^{уп} + \sigma_d^{упр}$). Среднее напряжение сдвига $\sigma_d = 320 \text{ МПа}$, моментные (локальные) напря-

жения $\sigma_d = 660 \text{ МПа}$, причем пластическая составляющая – 320 МПа, упругая – 340 МПа. Во фрагментированном феррите выполняется условие $\sigma_{л} < \sigma_d$, хотя величина σ_d незначительно превышает величину $\sigma_{л}$. Однако это свидетельствует о том, что именно эти участки материала могут привести к появлению микротрещин.

При исследовании структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений на расстоянии 1 мм от зоны локализованной деформации для образцов из стали марки 12Х1МФ после эксплуатации без разрушения установлено, что морфологическими составляющими α -фазы являются перлит и феррит. Объемная доля перлита составляет 22 %, феррита – 78 %. Характерные изображения феррито-перлитной микроструктуры показаны на рис. 2 и 3. Перлит на расстоянии 1 мм от зоны локализованной деформации практически полностью разрушен (рис. 2). Четко идентифицировать его можно только по микродифракционным картинкам (рис. 2). Объемная доля цементита в перлитных зернах составляет 7,8 %. Тип дислокационной субструктуры между прослойками феррита сетчатый. Скалярная плотность дислокаций равна $3,40 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В перлитных зернах также выявлена поляризация дислокационной субструктуры. Амплитуда кривизны-кручения, определенная по ширине изгиба экстинкционных контуров, $\chi = 505 \text{ см}^{-1}$, а избыточная плотность дислокаций составляет $2,02 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($\rho > \rho_{\pm}$). Средняя

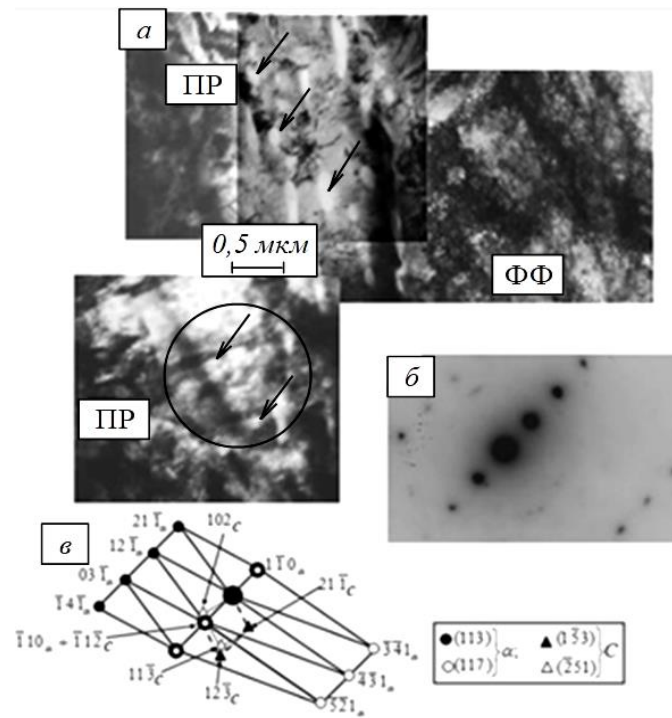


Рис. 2. Изображение структуры образцов из стали марки 12Х1МФ после длительной эксплуатации на расстоянии 1 мм от зоны локализованной деформации (феррита и перлита):

a – светлопольное изображение; *b* – микродифракционная картина, полученная с участка, отмеченного окружностью на поз. *a*; *c* – индиферованная схема (присутствуют рефлексы, относящиеся к цементиту и α -фазе); ПР – разрушенный перлит (стрелками отмечены частицы цементита)

Fig. 2. An image of the structure of samples made of 12X1MF steel after prolonged operation at a distance of 1 mm from the zone of localization of deformation (ferrite and perlite):

a – a light-field image; *b* – a microdiffraction pattern obtained from the area marked with a circle in pos. *a*; *c* – an integrated circuit (there are reflexes related to cementite and α -phase); ПР – destroyed perlite (arrows indicate cementite particles)

амплитуда напряжения сдвига $\sigma_d = 365$ МПа, а среднее значение амплитуды дальнедействующих (локальных) напряжений $\sigma_d = 280$ МПа ($\sigma_d > \sigma_d$). Таким образом, в зернах перлита изгиб-кручение кристаллической решетки феррита также обусловлен дислокационной субструктурой и является чисто пластическим.

Установлено наличие как не фрагментированного, так и фрагментированного феррита (рис. 3). Объемные доли не фрагментированного и фрагментированного феррита составляют 15 и 63 %. В исследованном материале зерна не фрагментированного феррита состоят из феррито-карбидной смеси, при этом частицы карбида $Me_{23}C_6$, имеющие округлую форму, находятся внутри зерен феррита. В зернах нефрагментированного феррита размер частиц выровнялся и в среднем составляет 42 нм. Объемная доля карбидных частиц в зернах не фрагментированного феррита 0,47 %. Как и в прослойках феррита перлитных зерен во всех зернах не фрагментированного феррита тип дислокационной субструктуры сетчатый. Средняя скалярная плотность дислокаций составляет $2,79 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

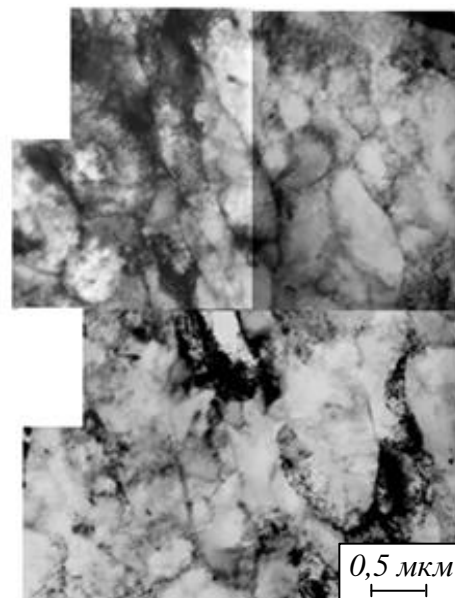


Рис. 3. Изображение структуры образцов из стали марки 12Х1МФ после длительной эксплуатации на расстоянии 1 мм от зоны локализованной деформации (фрагментированный феррит)

Fig. 3. Image of the structure of samples made of 12X1MF steel after prolonged operation at a distance of 1 mm from the zone of localized deformation (fragmented ferrite)

Дислокационная структура поляризована как и в перлитных зернах. Амплитуда кривизны-кручения, определенная по ширине изгиба экстинкционных контуров, составляет 500 см^{-1} , избыточная плотность дислокаций – $2,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ($\rho > \rho_{\pm}$). Были измерены внутренние напряжения: средняя амплитуда напряжения сдвига 310 МПа; средняя амплитуда дальнедействующих (локальных) напряжений 280 МПа ($\sigma_{\text{л}} > \sigma_{\text{д}}$). Из этого следует, что в не фрагментированном феррите, как и в зернах перлита, изгиб-кручение кристаллической решетки обусловлен дислокационной субструктурой и является чисто пластическим. В зернах фрагментированного феррита присутствуют теперь как анизотропные, так и изотропные фрагменты. Границы фрагментов довольно четкие и состоят из дислокаций. Тип дислокационной субструктуры внутри фрагментов содержит дислокации, образующие сетки. Частицы карбида Me_{23}C_6 обнаружены как на границах, так и внутри фрагментов, которые обладают округлой формой (средний размер 28 нм, объемная доля – 0,47 %); частицы на границах фрагментов крупнее (среднего размера 36 нм, объемная доля – 1,0 %).

Тип дислокационной субструктуры внутри фрагментов, как и в не фрагментированном феррите сетчатый. Скалярная плотность дислокаций составляет $2,79 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки во фрагментах составляет 485 см^{-1} , а избыточная плотность дислокаций – $1,94 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$; $\sigma_{\text{л}} = 280 \text{ МПа}$; $\sigma_{\text{д}} = 335 \text{ МПа}$. Поэтому условия $\rho > \rho_{\pm}$ и $\sigma_{\text{л}} > \sigma_{\text{д}}$ выполняются как и для не фрагментированного феррита, а изгиб-кручение кристаллической решетки также является чисто пластическим.

Сопоставление количественных показателей структурно-фазового состояния (скалярная и избыточная плотности дислокаций, амплитуды полей внутренних напряжений) показывает, что в зонах локализации деформации опасность зарождения микротрещин гораздо выше, чем на расстоянии от них.

Выводы

Выполнен анализ структурно-фазового состояния и полей внутренних напряжений на расстоянии от зон локализации деформации для образцов из теплоустойчивой стали. Микроструктура металла всех исследованных участков образцов после деформации до образования зон устойчивой локализации деформаций состоит из феррита и перлита. Занимающий большую часть объема материала феррит представлен как не фрагментированный, так и фрагментированный. Анализ качественных и количественных показателей структурно-фазового состояния позволил

выявить различия в металле образцов из стали марки 12Х1МФ в зонах устойчивой локализации деформации и на расстоянии от нее. Показано, что после кратковременных испытаний до устойчивой локализации деформации образцов не весь объем металла представлен одинаковой микроструктурой. Сопоставление количественных показателей структурно-фазового состояния (скалярная и избыточная плотность дислокаций, амплитуды полей внутренних напряжений) показало, что в зонах локализации деформации опасность зарождения микротрещин гораздо выше, чем на расстоянии от них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В.В. *Деградация диагностики безопасности*. 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. Grib V.V., Petrova I.M., Romanov A.N. Estimation of the probability of mechanical systems breakdown by technical state modelling. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016;45(5):433–437. <https://doi.org/10.3103/S1052618816050095>
4. Ботвина Л.Р., Будуева В.Г., Остапенко А.А., Тютин М.Р., Демина Ю.А., Солдатенков А.П., Жаркова Н.А. Механические свойства и механизмы разрушения крупногабаритных емкостей из сплава АМгб после длительной эксплуатации. *Деформация и разрушение материалов*. 2013;12:28–35.
5. Demina Y.A., Tyutin M.R., Marchenkov A.Y., Levin V.P., Botvina L.R. Effect of Long-Term Operation on the Physical and Mechanical Properties and the Fracture Mechanisms of X70 Pipeline Steels. *Russ. Metall*. 2022;2022:452–462. <https://doi.org/10.1134/s0036029522040127>
6. Romanov A.N., Filimonova N.I. Deformation Resistance and Damage Accumulation of Unstable Structural Material under Cyclic Elastoplastic Deformation. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2019;48(5):440–445. <https://doi.org/10.3103/S1052618819050108>
7. Тихомирова Е.А., Рыбников А.И., Гецов Л.Б. Изменение структуры и свойств монокристаллических жаропрочных сплавов в процессе длительной эксплуатации. *Металловедение и термическая обработка*. 2017;1(739):33–38.
8. Демченко М.В., Кузеев И.Р. Закономерности изменения морфологии рельефа по-

- верхности сварного соединения нефтегазового оборудования в условиях эксплуатации. *Нанотехнологии в строительстве*. 2018;10(4):39–56.
9. Polyakov A., Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Methodological Foundations for Choosing the Materials for Gears according to Wear Resistance Criteria. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2019;48(4):328–335. <https://doi.org/10.3103/S1052618819040125>.
 10. Петрова И.М., Гадолина И.В., Ботвина Л.Р., Демина Ю.А., Тютин М.Р. Влияние длительного старения на характеристики усталости стали 45. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2011;77(1):58–61.
 11. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Odintsev I.N., Razumovsky I.A. Methods of the calculation and experimental determination of the local residual stresses under spectrum development of complex loading. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015;44(6):531–538. <https://doi.org/10.3103/S1052618815060096>
 12. Горынин И.В., Тимофеев Б.Т. Деградация свойств конструкционных материалов при длительном воздействии эксплуатационных температур. *Вопросы материаловедения*. 2011;1(65):41–59.
 13. Константинов В.М., Пучков Э.П., Галимский А.И. Особенности эксплуатации и свойства конструкционных сталей при работе в условиях климатического холода. *Ползуновский альманах*. 2014;2:41–44.
 14. Romanov A.N. Damage accumulation and limit states under the low-cycle loading of structural softening steel. *Engineering Failure Analysis*. 2022;142:106836. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106836>
 15. Getsov L., Semenov A., Semenov S., Rybnikov A., Tikhomirova E. Thermal fatigue of single-crystal superalloys: experiments, crack-initiation and crack-propagation criteria. *Materials and technology*. 2015;49(5):773–778.
 16. Makhutov N.A., Gadenin M.M. Analysis and control of the strength, useful life, and safe operation risks of power plants with various kinds of energy commodities. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022;51(1):37–45. <https://doi.org/10.3103/S105261882201006X>
 17. Зуев, Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А., Плосков Н.А. О природе упругопластического инварианта деформации. *ЖТФ*. 2018;88(6):855–859.
 18. 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>
 19. 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>
 20. 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). <https://doi.org/10.3390/met11101638>
 21. 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>
 22. 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>
 23. Конева Н.А., Козлов Э.В. Закономерности субструктурного упрочнения. *Известия вузов. Физика*. 1991;34(3):С. 56–70.
 24. 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>
 25. 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: ИЦ СибГИУ, 2007:177.
 26. Конева Н.А., Попова Н.А., Козлов Э.В. Размер зерен и фрагментов микроуровня как фактор, определяющий плотность дислокаций. *Известия РАН. Серия физическая*. 2011;75(5):709–712.
 27. 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.
 28. 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. *Steel in Translation*. 2014;44(12):883–885. <https://doi.org/10.3103/S0967091214120067>

29. 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>
30. 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.
31. 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. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-135-141](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-135-141)
- ### REFERENCES
1. Klyuev V.V. *Degradation of safety diagnostics*. Moscow: Izda-tel'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. etc. *Structural and phase states of promising metal materials*. Novokuznetsk: Izd-vo NPK. 2009:613. EDN: SNBGKB.
 3. Grib V.V., Petrova I.M., Romanov A.N. Estimation of the probability of mechanical systems breakdown by technical state modelling. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016;45(5):433–437. <https://doi.org/10.3103/S1052618816050095>
 4. Botvina L.R., Budueva V.G., Ostapenko A.A., Tyutin M.R., Demina Yu.A., Soldatenkov A.P., Zharkova N.A. Mechanical properties and mechanisms of destruction of large-sized containers made of AMg6 alloy after prolonged operation. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2013;12:28–35. (In Russ.).
 5. Demina Y.A., Tyutin M.R., Marchenkov A.Y., Levin V.P., Botvina L.R. Effect of Long-Term Operation on the Physical and Mechanical Properties and the Fracture Mechanisms of X70 Pipeline Steels. *Russ. Metall*. 2022;2022:452–462. <https://doi.org/10.1134/s0036029522040127>
 6. Romanov A.N., Filimonova N.I. Deformation Resistance and Damage Accumulation of Unstable Structural Material under Cyclic Elastoplastic Deformation. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2019;48(5):440–445. <https://doi.org/10.3103/S1052618819050108>
 7. Tikhomirova E.A., Rybnikov A.I., Getsov L.B. Changes in the structure and properties of mono-crystalline heat-resistant alloys during long-term operation. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka*. 2017;1(739):33–38. (In Russ.).
 8. Demchenko M.V., Kuzeev I.R. Patterns of change in the morphology of the surface relief of the welded joint of oil and gas equipment under operating conditions. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2018;10(4):39–56. (In Russ.).
 9. Polyakov A., Kuksenova L.I., Alekseeva M.S. Methodological Foundations for Choosing the Materials for Gears according to Wear Resistance Criteria. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2019;48(4):328–335. <https://doi.org/10.3103/S1052618819040125>.
 10. Petrova I.M., Gadolina I.V., Botvina L.R., Demina Yu.A., Tyutin M.R. The effect of prolonged aging on the fatigue characteristics of steel 45. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2011;77(1):58–61. (In Russ.).
 11. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Odintsev I.N., Razumovsky I.A. Methods of the calculation and experimental determination of the local residual stresses under spectrum development of complex loading. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015;44(6):531–538. <https://doi.org/10.3103/S1052618815060096>
 12. Gorynin I.V., Timofeev B.T. Degradation of the properties of structural materials under prolonged exposure to operating temperatures. *Voprosy materialovedeniya*. 2011;1(65):41–59. (In Russ.).
 13. Konstantinov V.M., Puchkov E.P., Galimskii A.I. Features of operation and properties of structural steels when working in climatic cold conditions. *Polzunovskii al'manakh*. 2014;2:41–44. (In Russ.).
 14. Romanov A.N. Damage accumulation and limit states under the low-cycle loading of structural softening steel. *Engineering Failure Analysis*. 2022;142:106836. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106836>
 15. Getsov L., Semenov A., Semenov S., Rybnikov A., Tikhomirova E. Thermal fatigue of single-crystal superalloys: experiments, crack-initiation and crack-propagation criteria. *Materials and technology*. 2015;49(5):773–778.
 16. Makhutov N.A., Gadenin M.M. Analysis and control of the strength, useful life, and safe operation risks of power plants with various kinds of energy commodities. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2022;51(1):37–45. <https://doi.org/10.3103/S105261882201006X>

17. Zuev, L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A., Ploskov N.A. On the nature of the elastoplastic invariant of deformation. *ZhTF*. 2018;88(6):855–859. (In Russ.).
18. 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>
19. 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>
20. 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). <https://doi.org/10.3390/met11101638>
21. 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>
22. 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>
23. Конева Н.А., Козлов Э.В. Закономерности субструктурного упрочнения. *Известия вузов. Физика*. 1991;34(3):С. 56–70.
24. 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>
25. Kozlov E.V., Popova N.A., Kabanina O.V., Klimashin S.I., Gromov V.E. *Evolution of phase composition, defective structure, internal stresses and carbon redistribution during tempering of cast structural steel*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2007:177. (In Russ.).
26. Koneva N.A., Popova N.A., Kozlov E.V. *The size of grains and fragments of the microlevel as a factor determining the density of dislocations*. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*. 2011;75(5):709–712. (In Russ.).
27. Kozlov E.V., Trishkina L.I., Popova N.A., Koneva N.A. The place of dislocation physics in a multilevel approach to plastic deformation. *Fizicheskaya mezhmekhanika*. 2011;14(3):95–110. (In Russ.).
28. 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. *Steel in Translation*. 2014;44(12):883–885. <https://doi.org/10.3103/S0967091214120067>
29. 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>
30. Smirnov A.N., Kozlov E.V., Ababkov N.V., Kupchenko M.V. Modern methodological support for assessing the state of metal of potentially dangerous equipment. Part 1. Microscopy and X-ray diffraction analysis. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010;4:62–68. (In Russ.).
31. 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. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-135-141](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-135-141)

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

Information about the author:

Nikolay V. Ababkov, Cand. Sci., 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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 02.02.2024

После доработки 26.02.2024

Принята к публикации 28.02.2024

Received 02.02.2024

Revised 26.02.2024

Accepted 28.02.2024