ISSN 2618-9712 (Print) http://no.ysn.ru

УДК 539.3; 539.42
DOI 10.31242/2618-9712-2018-24-2-67-75

Механизмы повреждения материалов и элементов стальных конструкций, эксплуатирующихся в экстремальных условиях Севера

В.В. Лепов[*], А.В. Григорьев[*], А.М. Иванов[*], В.С. Ачикасова[*], А.А. Иванова[*], Н.С. Балаклейский[**], Б.А. Логинов[**], А.Б. Логинов[***], Л.Г. Анемподистова[****]

[*]*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия*
[**]*Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Россия*
[***]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[****]*Физико-технический институт Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия*

Аннотация. *На основе микроструктурных исследований с помощью средств электронной (сканирующей туннельной и растровой) микроскопии рассмотрены возможности анализа микромеханизмов и закономерностей накопления повреждений и разрушения сталей, включая упрочненные с помощью методов интенсивной пластической деформации. На основе разработанного подхода проведен анализ неоднородности упрочнения стали, выявляющий механизмы разрушения на различных структурных уровнях, чтобы понять закономерности процесса и разработать меры по предотвращению или снижению накопления повреждений. В частности, рассмотрены случаи разрушения боковой рамы вагонной тележки, когда немаловажное значение приобретает такой показатель надежности в условиях отрицательных температур, как величина ударной вязкости KCV. Предложен критерий оценки ресурса литых деталей железнодорожного транспорта на основе модели накопления поврежденности в материале, испытывающем низкотемпературный вязкохрупкий переход.*

Ключевые слова: механизм разрушения, накопление повреждений, фрактография, электронная микроскопия, оценка ресурса, локомотивное колесо, экстремальные условия, ударная взякость, низкотемпературный вязкохрупкий переход.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-48-140015) и Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект III.28.1.1.) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Станция натурных испытаний» ИФТПС СО РАН.

DOI 10.31242/2618-9712-2018-24-2-67-75

Mechanisms of damage to materials and elements of steel structures operating in extreme conditions of North

V.V. Lepov[*], A.V. Grigor'ev[*], A.M. Ivanov[*], V.S. Achikasova[*], A.A. Ivanova[*], N.S. Balaklejskij[**], B.A. Loginov[**], A.B. Loginov[***], L.G Anempodistova[****]

[*]*V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russia*
[**]*National Research University of Electronic Technology «MIET», Zelenograd, Russia*
[***]*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[****]*Institute of Physics and Technologies of the M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia*

Abstract. *In the article on the basis of microstructural studies by means of electronic (scanning tunneling and raster) microscopy, possibilities of analysis of micromechanisms and regularities of damage accumula-*

tion and fracture of steels, including those hardened by methods of intense plastic deformation, are considered. Based on a developed approach, the analysis of inhomogeneity of hardening of steel is conducted, revealing the mechanisms of fracture at various structural levels in order to understand the process regularities and to develop measures to prevent or reduce the damage accumulation. In particular, cases of fracture of a side frame of a truck are considered, when such an index of reliability in conditions of negative temperatures as a value of impact toughness KCV, gains in importance. A criterion of a lifetime estimation of rail transport molded pieces on the basis of a model of the damage accumulation in a material experiencing a low-temperature ductile-brittle transition has been proposed.

Key words: fracture mechanism, damage accumulation, fractography, electron microscopy, lifetime estimation, locomotive wheel, extreme environment, impact toughness, low-temperature ductile-brittle transition.

Acknowledgments. The work was carried out with support of the Russian Foundation for Basic Research (project 18-48-140015) and the Program of Fundamental Scientific Research of the State Academies of Sciences (project III.28.1.1.) using the equipment of the Center for Collective Use «Station of Full-scale Testing» of IPTPN SB RAS.

Введение

Моделирование процессов разрушения стальных конструкций, эксплуатирующихся в условиях низких климатических температур, с целью прогнозирования их поведения, оценки и продления ресурса, требует знания микромеханизмов накопления повреждений на различных структурных уровнях [1]. Анализ неоднородности упрочнения стали на поверхности локомотивных колес на микроуровне, например, позволяет не только идентифицировать процесс усталостно-ударного разрушения, но и установить его характер, чтобы понять закономерности процесса и разработать меры по предотвращению или снижению износа [2]. Проведение таких исследований на нано- и микромасштабе становится возможным только с помощью детальных электронно-микроскопических исследований и количественных методов анализа изображений [3].

Исследователей также продолжают привлекать большим потенциалом применения в условиях холодного климата, благодаря своим высоким механическим характеристикам и хладостойкости, стали и сплавы, упрочнённые комбинированным воздействием интенсивной пластической деформации [4]. Микроструктурные исследования поверхностей деформации таких материалов позволили оценить влияние границ зерен на процесс накопления повреждений в условиях низких температур [5], а также исследовать возможные проявления вязкохрупкого перехода в ОЦК-сталях [6].

Материалы и оборудование

В работе исследовалась сталь бандажа локомотивного колеса, выработавшего свой ресурс в условиях эксплуатации на участке железной дороги Алдан–Томмот–Якутск. В табл. 1 представлены усредненные значения механических характеристик и ударной вязкости, полученные

Таблица 1

Механические характеристики образцов из материала локомотивного колеса

Mechanical characteristics of samples of material of locomotive wheel

Температура испытаний, °С	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_в$, Мпа	δ, %	KCV, Дж/см^2
20	690,16	1037,2	10,28	1,82
–20	-	-	-	1,36
–40	755,74	1066,67	8,63	-
–50	-	-	-	0,73
–60	-	-	-	0,62

для образцов из материала бандажа локомотивного колеса, выведенного из эксплуатации в результате износа. Согласно регламенту, бандаж изготовлен из термообработанной углеродистой низколегированной колесной стали марки 2 с ферритно-перлитной структурой. Механические свойства данной стали повышаются с понижением температуры, однако существенно падает её трещиностойкость – способность противостоять динамическим ударным нагрузкам.

Также был выполнен анализ микроструктуры, включая количественный фрактальный анализ, и стали Ст3сп, подверженной длительной эксплуатации в составе газопровода, а также интенсивной пластической деформации. В табл. 2

Таблица 2

Данные механических испытаний на растяжение образцов из трубной стали Ст3сп

Data of mechanical tensile tests of St3sp pipe steel samples

Состояние материала	Предел текучести $\sigma_т$, МПа	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Относительное удлинение при разрыве δ, %
Исходное	312,5	455	19,95
Исходное, РКУП	750	772,5	4,09
Эксплуатация 30 лет, РКУП	768,6	791,1	5,62

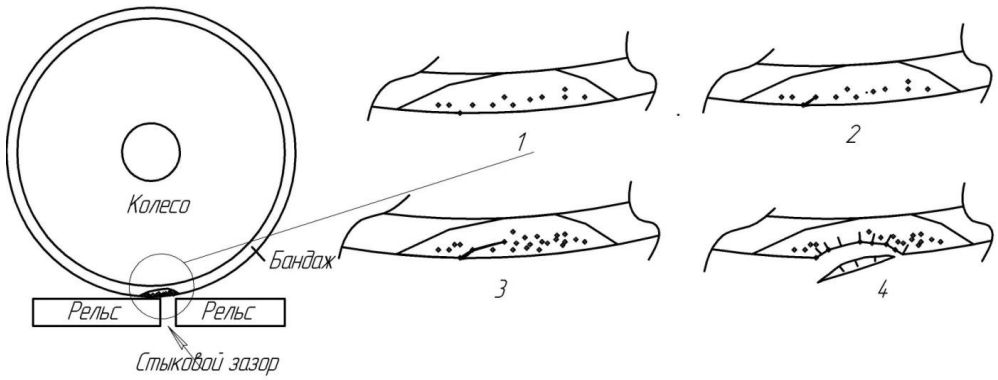


Рис. 1. Схема зарождения и распространения трещины по механизму ударно-контактного выкрашивания бандажа локомотивного колеса: 1 – образование микродефектов без взаимодействия друг с другом; 2, 3 – зарождение и рост трещины путем слияния микродефектов; 4 – выкрашивание поверхности катания бандажа локомотивного колеса

Fig. 1. Scheme of initiation and propagation of crack in locomotive tire by impact-contact pitting mechanism: 1 – formation of microdefects without mutual interaction; 2, 3 – crack nucleation and growth by coalescence of microcracks; 4 – locomotive tire roll surface pitting

представлены данные механических испытаний образцов из трубной стали Ст3сп, изготовленных из аварийного запаса и после 30 лет эксплуатации в условиях Севера, прошедших обработку интенсивной пластической деформацией в четыре прохода «теплого» (400 °С) равноканального углового прессования по режиму «С».

Для микроструктурного анализа использовались портативный микроскоп Hitachi TM-3030 в режиме низкого вакуума с напряжением 15 kB, а также встроенная приставка для энергодисперсионного микроанализа Bruker XFlash MIN SVE.

Результаты и обсуждение

Предполагаемая схема ударно-контактного выкрашивания бандажа локомотивного колеса в условиях интенсивного изнашивания при низких климатических температурах представлена на рис. 1.

В подтверждение данного механизма на рис. 2 показаны полученные методом электронной растровой микроскопии изображения поверхности образцов, вырезанных из бандажа колеса вблизи образовавшейся в результате ударного воздействия и наклепа волосяной трещины при различных увеличениях, которые подтверждают предполагаемый механизм ударно-контактного выкрашивания. В частности, на рис. 2, *ж* представлено изображение поверхности трещины с наклепанным слоем материала, имеющего ручьистую усталостную структуру.

Результаты элементного энергодисперсионного анализа поверхности образца с трещиной представлены на рис. 3. Видно, что вокруг трещины происходит сегрегация химических элементов и примесей. Возможно, трещина образовалась на цепочке неметаллических включений (Al_2O_3). В значительных количествах присутствуют хром, как легирующий элемент стали, и кислород, свидетельствующий о существенном окислении поверхности.

Согласно данным табл. 2, упрочненная после длительной эксплуатации сталь обладает повышенными механическими характеристиками, включая пластичность, что может быть объяснено, очевидно, только микроструктурными факторами.

Данные образцы на растяжение были соответствующим образом подготовлены и исследованы методом электронной туннельной микроскопии в зонах утяжки по методике, описанной авторами ранее [5]. На рис. 4 представлены изображения поверхностей, полученных на расстоянии около 2 мм от места разрыва. При этом механизм деформации остается вязким, однако для стали, прошедшей РКУП, наблюдается значительное изменение рельефа пластического течения вследствие измельчения зерна, причем в последнем случае можно отметить существенную неоднородность деформации. Более подробную информацию может дать морфологический структурный и количественный фрактальный анализ. На рис. 5 представлены результаты морфологического анализа и расчет фрактальной размерности приведенных на рис. 4 изображений.

Фрактальная размерность равномерно увеличивается от исходного материала до обработанного РКУП и после эксплуатации и обработки РКУП. Таким образом, более высокая начальная неоднородность материала по механическим характеристикам и сегрегациям примесей позволяет добиться и более высоких результатов после интенсивной пластической деформации.

Для более тщательного количественного описания неоднородностей на микроуровне предла-

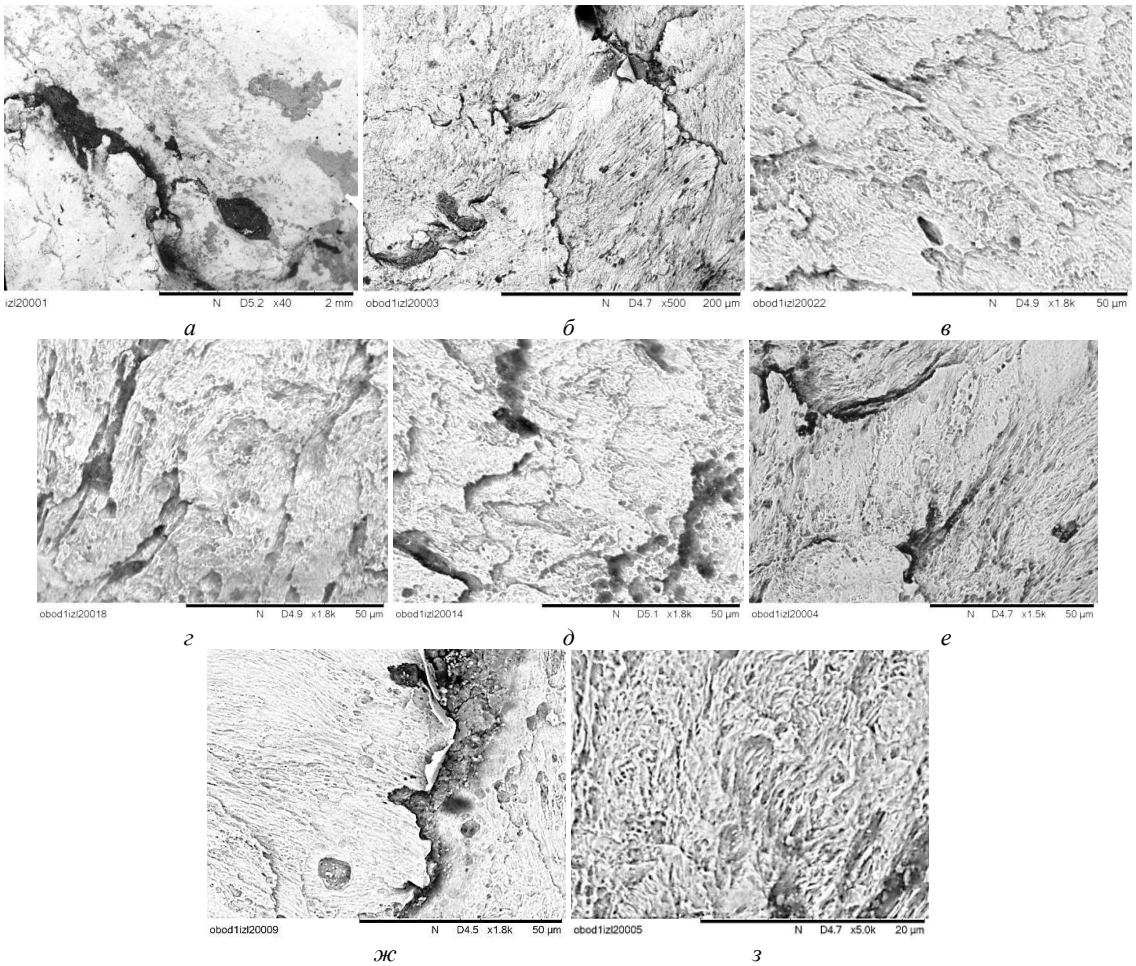


Рис. 2. Изображения поверхности бандажа локомотивного колеса в вершине трещины, полученные методом электронной сканирующей микроскопии с различным увеличением: *а* – общий вид трещины, ×40; *б* – участок в вершине трещины, ×500; *в* – участок наклепанной стали сбоку от трещины, ×1800; *г, д, е* – участки непосредственно в вершине трещины, ×1800; *ж* – трещина, ×1800; *з* – участок отслоения,×5000

Fig. 2. Images of locomotive tire surface near crack tip (scanning electron microscopy (SEM), 15kV) at different magnifications: *a* – crack overview, ×40; *b* – area near crack tip, ×500; *c* – area of work-hardened steel at side of crack, ×1800; *d–f* – areas near crack tip, ×1800; *g* – face of crack, ×1800; *h* – peeling area, ×5000

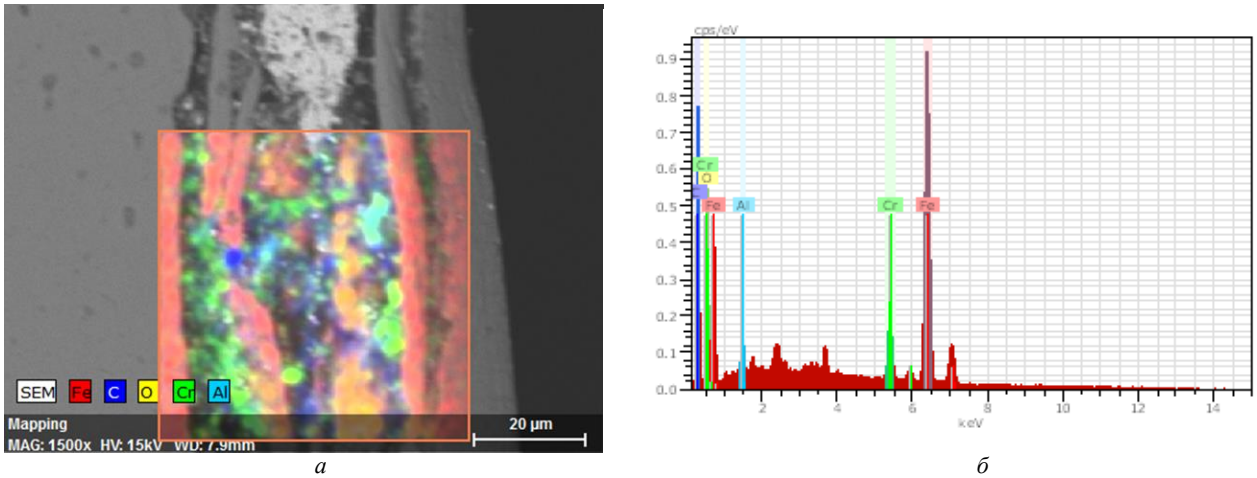
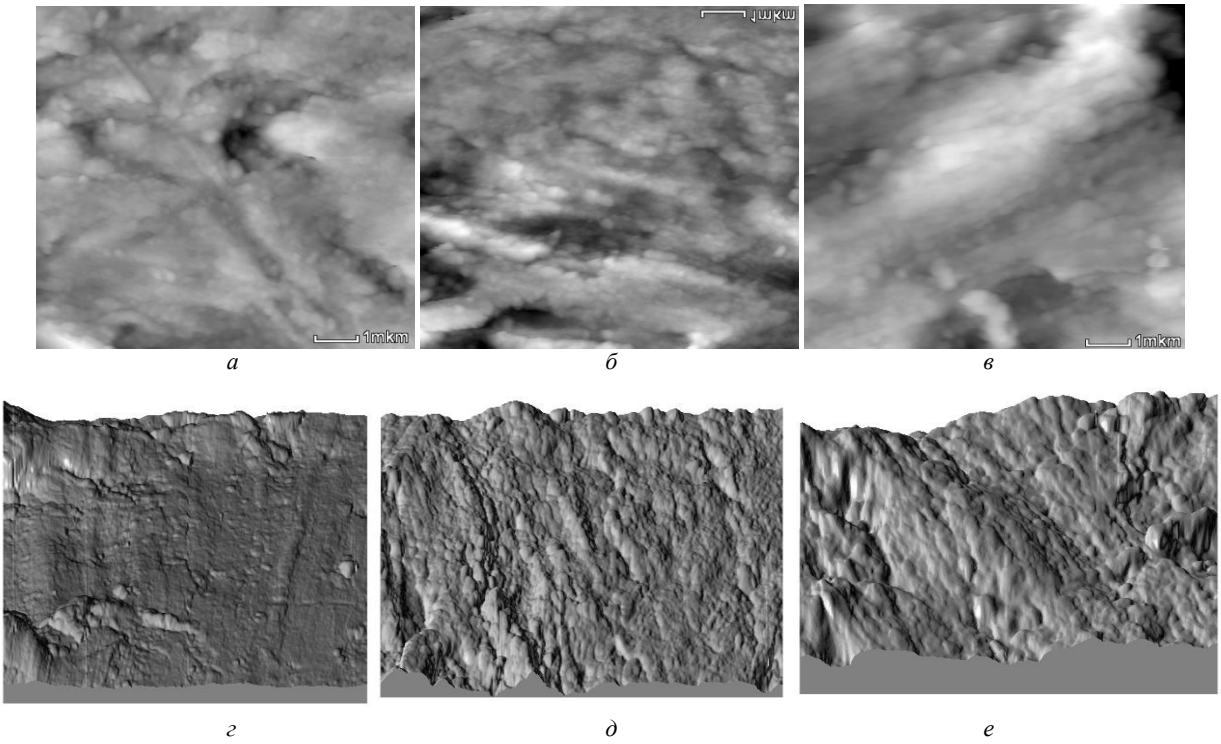


Рис. 3. Результаты элементного анализа боковой поверхности трещины на бандаже локомотивного колеса: *а* – распределение элементов по площади участка, ×1500; *б* – диаграмма количественного соотношения химических элементов

Fig. 3. Results of energy dispersion analysis of side surface of crack of locomotive tire steel probe: *a* – chemical element distribution over area surface, ×1500; *b* – quantitative ratio diagram of chemical elements

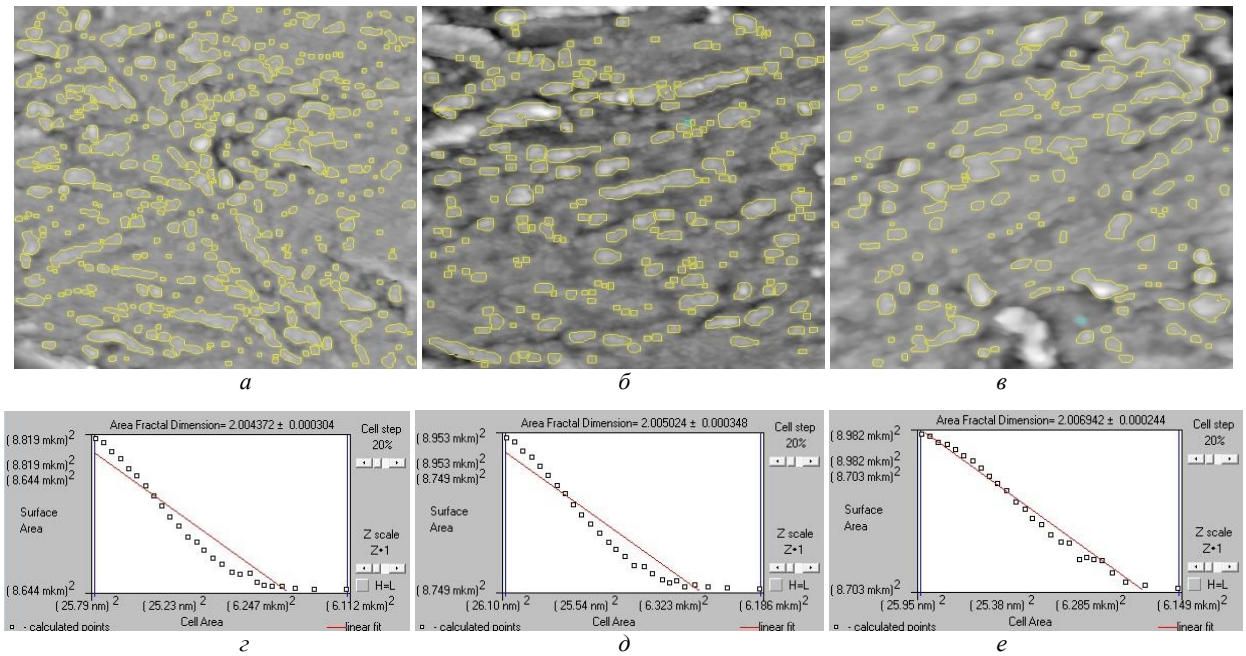


а *б* *в*

г *д* *е*

Рис. 4. Двухмерные (*а–в*) и трехмерные (*г–е*) образы поверхности утяжки образцов из стали Ст3сп в исходном состоянии (*а, г*), после РКУП (*в, д*) и после эксплуатации и РКУП (*е*)

Fig. 4. 2D (*a–c*) and 3D ASM-images (*d–f*) of deformation surfaces near rupture of St3sp steel probes in as-received condition (*a*, *d*), after hardening process (*c*, *e*) and after long usage and hardening process (*f*)



а *б* *в*

г *д* *е*

Рис. 5. Анализ морфологического строения (*а–в*) и фрактальный анализ (*г–е*) изображений поверхности утяжки образцов из стали Ст3сп в исходном состоянии (*а, г*), после РКУП (*в, д*) и после эксплуатации и РКУП (*е*)

Fig. 5. Morphological (*a–c*) and fractal (*d–f*) analysis of ASM-images of deformation surfaces of St3sp steel probes in as-received condition (*a*, *d*), after hardening process (*b*, *e*) and after long usage and hardening process (*c*, *f*).

гается применить концепцию статистического фрактала [3]. Мультифрактальный анализ позволяет выявить характерные особенности процесса разрушения упрочнённой методом РКУП стали. Предварительные результаты показали, что сталь, находящаяся в эксплуатации, после обработки РКУП приобретает большую однородность на микроуровне, что должно существенно повысить хладостойкость материала. Такой вывод должны подтвердить запланированные экспериментальные исследования.

Другой аспект проблемы связан с низкотемпературными фазовыми переходами в стали, резкими колебаниями температуры, недостаточным уровнем обслуживания и ремонта. Данные факторы по своей природе имеют стохастический характер и требуют применения соответствующего математического аппарата и численного моделирования [7, 8].

От свойств материала крупных литых деталей подвижного состава (боковая рама, надрессорная балка и др.) напрямую зависит безопасность железнодорожных грузоперевозок. Известно, что максимальное количество изломов литых боковых рам тележек приходится именно на зимний период (рис. 6). Таким образом, исследования, посвященные поведению литых деталей в условиях низких климатических температур, в настоящее время требуют особого внимания, несмотря на то, что имеется достаточно известных работ по изучению влияния низких температур на прочностные свойства и хладостойкость, а также на трещинообразование и охрупчивание материалов и снижение живучести конструкции [8, 9].

Однако для крупного железнодорожного литья из сталей 20ГЛ, 20ГФЛ, 20ГТЛ существующие требования технической службы «РЖД» по показателю ударной вязкости при температуре –60°С (KCV_{-60}), наиболее характеризующему трещиностойкость и надежность элемента литья в эксплуатации при отрицательных температурах, носят рекомендательный характер. Так, например, анализ статистических данных по выплавленной в мартеновской печи стали 20ГЛ на предприятии «ПК «БСЗ» показал, что в соответствии с повышенными требованиями уровень ударной вязкости KCV_{-60}>1,7 кгс·м/см^2 достигнут только в 58,7 % (871 плавка) и KCV_{-60}> 2,0кгс·м/см^2 – в 30,3 % (450 плавок) от общего количества плавок (1483 плавки) [10].

Поэтому требуется углубленное исследование данного вопроса в целях обоснования необходимости модернизации применяемых в настоящее время стандартных сталей крупного железнодорожного литья на более хладостойкие марки, что с учетом новых, более интенсивных условий эксплуатации железнодорожной техники в зимних условиях Сибири и Крайнего Севера внесет фундаментальные данные в этой области.

Чаще всего трещины в боковых рамах тележек образуются в следующих зонах (рис. 7):

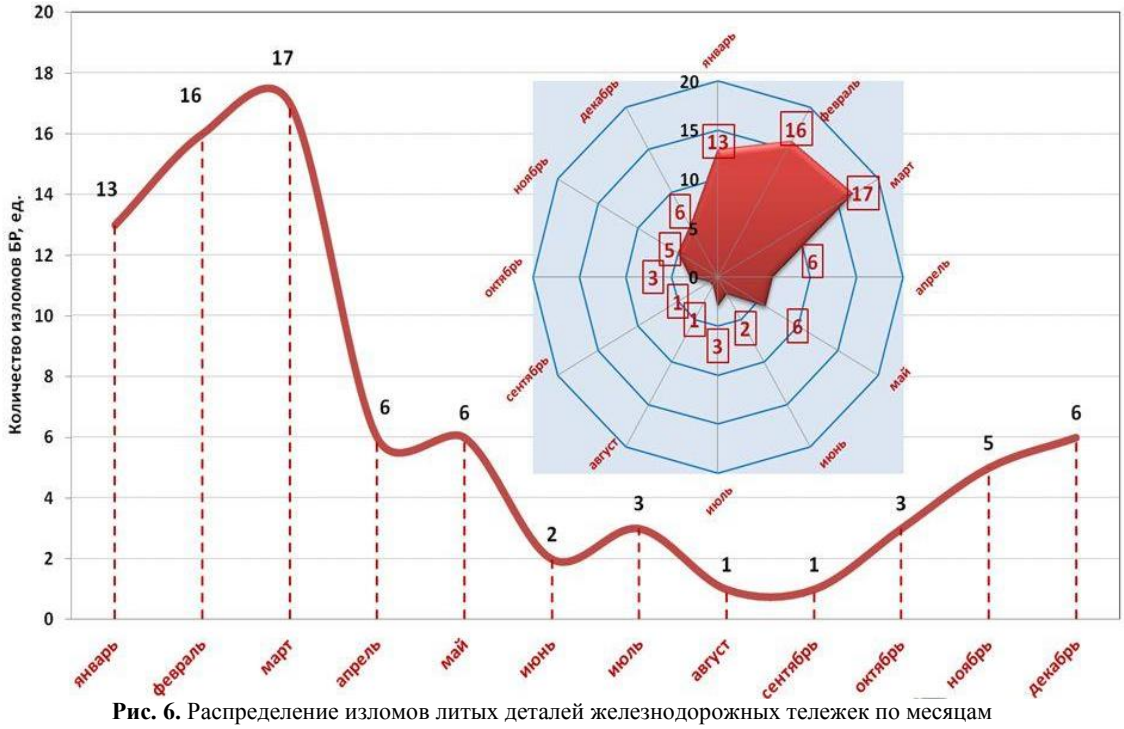


Рис. 6. Распределение изломов литых деталей железнодорожных тележек по месяцам

Fig. 6. Distribution of fractures of molded pieces of railway carriages by months

1) в буксовых проемах, вследствие неравномерного прилегания к корпусу буксы направляющих и наличия пороков, раковин в металле;

2) в буксовых проемах – на радиусе 55 мм, а также в местах по направлению к отверстию, находящемуся над буксовым проемом, если имеются раковины, вырубки, при наличии сварки;

3) на внутреннем поясе от технологического отверстия под буксовым проемом до боковой стенки смотрового окна;

4) в вертикальном поясе боковины;

5) в верхнем поясе над технологическим проемом при наличии раковин, брака в литье, в местах уменьшения толщины боковой стенки смотрового окна.

Наблюдения за работоспособностью боковых рам в эксплуатации показали, что до 85 % всех повреждений носят характер усталостных повреждений [11].

Учитывая влияние на материал низкотемпературного вязкохрупкого перехода и выявленный характер повреждений, для прогнозирования ресурса элементов литых конструкций подвижного состава возможно использование ранее предложенного авторами уравнения накопления повреждений в следующем виде [12]:

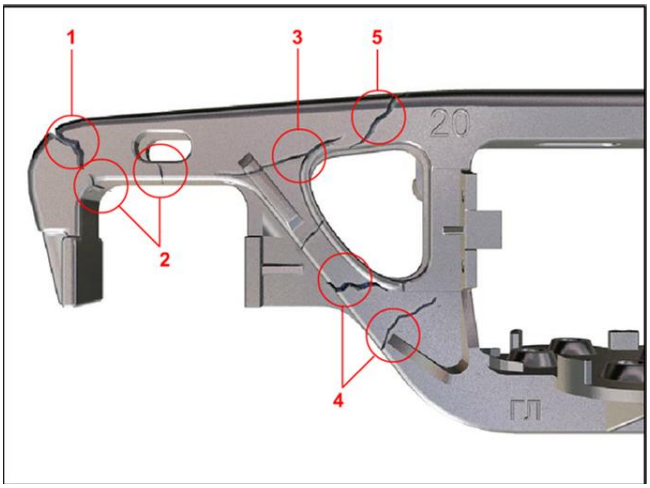


Рис. 7. Места наибольшей вероятности образования трещин в боковых рамах

Fig. 7. Most probable cracking places in molded side frames

$$\Psi_L = \frac{1}{K}\sum_{j=1}^{K}\int_{T_0}^{T_{\text{ý}j}}\left(\left(1-\frac{KCV_j(T)}{KCV_0}\right)^m\right),$$

где KCV_0, KCV_j – ударная вязкость при комнатной температуре и в момент j-го повреждения, соответственно, m ~ 0,25–0,3 – коэффициент, зависящий от материала и вида НДС.

Выражение служит приближённой оценкой общей поврежденности в условиях низких климатических температур. В таком случае условие достижение поврежденности единице Ψ=1 будет соответствовать предельному числу нагружений и определять ресурс боковой рамы. Для более точного прогнозирования поврежденности материала крупных литых деталей подвижного состава необходимо провести серию экспериментов по определению ударной вязкости KCV образцов с v-образным надрезом в диапазоне температур от 20 до –60 °С.

Заключение

Проведен анализ микромеханизмов и закономерностей накопления повреждений и разрушения сталей, включая выработавшие ресурс в составе локомотивного колеса в условиях Центральной Якутии, а также упрочненные с помощью методов интенсивной пластической деформации. На основе разработанного подхода проведен анализ неоднородности упрочнения стали, выявлены механизмы разрушения на различных структурных уровнях. Рассмотрены случаи разрушения боковой рамы вагонной тележки, когда немаловажное значение приобретает такой показатель надежности в условиях отрицательных температур, как величина ударной вязкости KCV. Согласно предложенному критерию оценки ресурса литых деталей вагонных тележек, возможна оценка поврежденности материала, учитывающая явление вязкохрупкого перехода в стали.

Следует также отметить, что замена производителем материала крупных литых элементов железнодорожного транспорта на более вязкий, например на сталь с повышенным содержанием ванадия или полученной из руды Томторского месторождения Республики Саха (Якутия), уже содержащей микродобавки редкоземельных элементов [13], в стратегическом плане могла бы обеспечить многократное повышение ресурса и надёжности техники при эксплуатации в условиях Севера и Арктики.

Литература

1. *Лепов В.В., Ачикасова В.С., Иванова А.А., Лепова К.Я.* Структурный подход к многомасштабному моделированию эволюционных процессов в материалах с внутренней микроструктурой // Наука и образование. 2015. № 4. С. 82–87.

2. *Григорьев А.В., Лепов В.В.* Всесезонная модель оценки ресурса локомотивного колеса и рельса на основе анализа интенсивности бокового износа // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. № 8(127). С.186–192.

3. *Иванова А.А., Лепов В.В., Ачикасова В.С., Иванов А.М.* Применение концепции статистического фрактала при анализе поверхностей деформации образцов // Наука и образование. 2016. № 4. С. 89–93.

4. *Коваленко Н.Д., Сыромятникова А.С., Лепов В.В., Иванов А.М.* Обработка конструкционных сталей комбинированным воздействием экструзией и винтовым прессованием // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 1. С. 234–237.

5. *Lepov V.V. et al.* The Mechanism of Nanostructured Steel Fracture at Low Temperatures, Nanotechnologies in Russia. 2008. № 3. P. 734–742.

6. *Ачикасова В.С., Лепов В.В.* Низкотемпературный вязкохрупкий переход и внутреннее трение // Наука и образование. 2015. № 1. С. 75–77.

7. *Valeriy Lepov, Albert Grigoriev, Mbelle Samuel Bisong, Kyunna Lepova.* Brittle Fracture Modeling for Steel Structures operated in the Extreme // Procedia Structural Integrity. 2017. V. 5. P. 777–784.

8. *Valeriy Lepov, Albert Grigoriev, Valentina Achikasova, Kyunna Lepova*. Some Aspects of Structural Modeling of Damage Accumulation and Fracture Processes in Metal Structures at Low Temperature // Modelling and Simulation in Engineering. 2016(1): 1–6 January 2016.

9. *Хладостойкость* материалов и элементов конструкций: Результаты и перспективы / В.П. Ларионов, В.Р. Кузьмин, О.И. Слепцов и др. Новосибирск: Наука, 2005. 290 с.

10. *Богданов Р.А., Давыдов С.В.* Влияние химического состава на ударную вязкость ответственных отливок грузовых вагонов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2012. № 4(36). С. 4–12.

11. *Сенько В.И., Пастухов М.И., Макеев С.В., Пастухов И.Ф.* Анализ причин повреждения и возможности продления срока службы боковых рам тележек грузовых вагонов // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2010. № 4(43). С. 13–18.

12. *Григорьев А.В., Лепов В.В.* Методика оценки ресурса железнодорожной техники, эксплуатируемой в экстремальных условиях Севера // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81, 12. С. 42–48.

13. *Похиленко Н.П., Толстов А.В.* Перспективы освоения Томторского месторождения комплексных ниобий-редкоземельных руд // Новой экономике – новые материалы. 2012. № 11. С. 17–27.

References

1. *Lepov V.V., Achikasova V.S., Ivanova A.A., Lepova K.Ya.* Strukturnyj podkhod k mnogomasshtabnomu modelirovaniyu evolyutsionnykh protsessov v materialakh s vnutrennej mikrostrukturoj // Nauka i obrazovanie. 2015. № 4. P. 82–87.

2. *Grigor'ev A.V., Lepov V.V.* Vsesezonnaya model' otsenki resursa lokomotivnogo kolesa i rel'sa na osnove analiza intensivnosti bokovogo iznosa // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. 8 (127). P. 186–192.

3. *Ivanova A.A., Lepov V.V., Achikasova V.S., Ivanov A.M.* Primenenie kontseptsii statisticheskogo fraktala pri analize poverkhnostej deformatsii obraztsov // Nauka i obrazovanie. 2016. 4(84). P. 89–93.

4. *Kovalenko N.D., Syromyatnikova A.S., Lepov V.V., Ivanov A.M.* Obrabotka konstruktsionnykh stalej kombinirovannym vozdejstviem ekstruziej i vintovym pressovaniem // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk. 2016. V.18, 1. P. 234–237.

5. *Lepov V.V. et al.* The Mechanism of Nanostructured Steel Fracture at Low Temperatures, Nanotechnologies in Russia. 2008. 3. P. 734–742.

6. *Achikasova V.S., Lepov V.V.* Nizkotemperaturnyj vyazko-khrupkij perekhod i vnutrennee trenie // Nauka i obrazovanie. 2015. 1(77). P. 75–77.

7. *Lepov V.V., Grigoriev A.V., Bisong M.S., Lepova K.Ya.* Brittle Fracture Modeling for Steel Structures operated in the Extreme // Procedia Structural Integrity. 2017. V. 5. P. 777–784.

8. *Lepov V.V., Grigoriev A.V., Achikasova V.S., Lepova K.Ya.* Some Aspects of Structural Modeling of Damage Accumulation and Fracture Processes in Metal Structures at Low Temperature // Modelling and Simulation in Engineering. 2016(1): 1–6 January 2016.

9. *Khladostojkost'* materialov i elementov konstruktsij: Rezul'taty i perspektivy / V.P. Larionov, V.R. Kuz'min, O.I. Sleptsov, i dr. Novosibirsk: Nauka, 2005. 290 p.

10. *Bogdanov R.A., Davydov S.V.* Vliyanie khimicheskogo sostava na udarnuyu vyazkost' otvetstvennykh otlivok gruzovykh vagonov // Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2012. 4(36). P. 4–12.

11. *Sen'ko V.I., Pastukhov M.I., Makeev S.V., Pastukhov I.F.* Analiz prichin povrezhdeniya i vozmozhnosti prodleniya sroka sluzhby bokovykh ram telezhek gruzovykh vagonov // Vestnik GGTU im. P.O. Sukhogo. 2010. 4(43). P. 13–18.

12. *Grigor'ev A.V., Lepov V.V.* Metodika otsenki resursa zheleznodorozhnoj tekhniki, ekspluatiruemoj v ekstremal'nykh usloviyakh Severa // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2015. V. 81, 12. P. 42–48.

13. *Pokhilenko N.P., Tolstov A.V.* Perspektivy osvoeniya Tomtorskogo mestorozhdeniya kompleksnykh niobij-redkozemel'nykh rud // Novoj ekonomike – novye materialy. 2012. № 11. S. 17–27.

Поступила в редакцию 10.06.2018

Об авторах

ЛЕПОВ Валерий Валерьевич, доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, http://orcid.org/0000-0003-2360-7983, lepov@iptpn.ysn.ru, wisecold@mail.ru;

ГРИГОРЬЕВ Альберт Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, http://orcid.org/0000-0001-9243-1454, greegor1212@mail.ru;

ИВАНОВ Афанасий Михайлович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, http://orcid.org/0000-0002-7659-789X, iam53@mail.ru;

АЧИКАСОВА Валентина Семеновна, инженер, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, http://orcid.org/0000-0002-7392-6571, achikasova@iptpn.ysn.ru;

ИВАНОВА Анастасия Анатольевна, младший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, 677980, Якутск, ул. Октябрьская, 1, http://orcid.org/0000-0002-1569-6739, anastiv@mail.ru;

БАЛАКЛЕЙСКИЙ Николай Сергеевич, магистрант, сотрудник кафедры, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, http://orcid.org/0000-0001-6930-4713, balakleyskiy@gmail.com;

ЛОГИНОВ Борис Альбертович, начальник лаборатории, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», 124498, Москва, Зеленоград, площадь Шокина, дом 1, http://orcid.org/0000-0001-5081-1424, b-loginov@mail.ru;

ЛОГИНОВ Антон Борисович, магистрант, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, ул. Ленинские Горы, 1, b-loginov@mail.ru;

АНЕМПОДИСТОВА Любовь Гаврильевна, магистрант, Физико-технический институт Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, 677891, Якутск, ул. Белинского, 58, lg.anempodistova@gmail.com.

About the Authors

LEPOV Valeriy Valerievich, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Scientific Work, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677980, Russia, http://orcid.org/0000-0003-2360-7983, lepov@iptpn.ysn.ru, wisecold@mail.ru;

GRIGOR'EV Al'bert Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Scientist, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677980, Russia, http://orcid.org/0000-0001-9243-1454, greegor1212@mail.ru;

IVANOV Afanasij Mikhailovich, Candidate of Technical Sciences, Leading Research Scientist, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677980, Russia, http://orcid.org/0000-0002-7659-789X, iam53@mail.ru;

ACHIKASOVA Valentina Semyonovna, Engineer, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677980, Russia, http://orcid.org/0000-0002-7392-6571, achikasova@iptpn.ysn.ru;

IVANOVA Anastassia Anatolievna, Junior Researcher, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, 1 Oktyabrskaya St., Yakutsk, 677980, Russia, http://orcid.org/0000-0002-1569-6739, anastiv@mail.ru;

BALAKLEYSKIY Nikolay Sergeevich, Master's Degree Student, Worker, National Research University of Electornic Technology «MIET», 1 Shokin Sq., Moscow, Zelenograd, 124498, Russia, http://orcid.org/0000-0001-6930-4713, balakleyskiy@gmail.com;

LOGINOV Boris Albertovich, Head of Laboratory, National Research University of Electornic Technology «MIET», 1 Shokin Sq., Moscow, Zelenograd,124498, Russia, http://orcid.org/0000-0001-5081-1424, b-loginov@mail.ru;

LOGINOV Anton Borisovich, Master’s Degree Student, M.V. Lomonosov Moscow State University, 1 Lenskie Gory, Bld. 3, Moscow, 119991, Russia, b-loginov@mail.ru;

ANEMPODISTOVA Lubov Gavrilievna, Master’s Degree Student, Institute of Physics and Technologies of the M.K. Ammosov North-East Federal University, 58 Belinsky St., Yakutsk, 677891, Russia, lg.anempodistova@gmail.com.