

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-8-53-58>

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛИ 09Г2С, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА И АРКТИКИ

© Альберт Викторович Григорьев*, Валерий Валерьевич Лепов

Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Россия, 677890, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1; *e-mail: greegor1212@mail.ru

*Статья поступила 7 декабря 2018 г. Поступила после доработки 10 февраля 2019 г.
Принята к публикации 25 марта 2019 г.*

Представлены результаты оценки поврежденности и ресурса элементов сварных металлоконструкций из стали 09Г2С при эксплуатации в экстремальных условиях Арктики и Субарктики. Механизм накопления повреждений в стали, претерпевающей низкотемпературный вязкохрупкий переход, оценивали по результатам измерения ударной вязкости образцов с V-образным надрезом в соответствующем интервале температур. На основе анализа экспериментальных данных установлено, что с понижением температуры в наибольшей степени теряет пластичность зона термического влияния, в которой локализуются напряжения и происходит ускоренное развитие трещин и микродефектов. В результате ресурс стальной конструкции снижается. На основе теории накопления повреждений Качанова – Работнова предложена методика оценки интегральной поврежденности материала сварной конструкции из стали, подверженной вязкохрупкому переходу, в зависимости от наработки в определенных климатических условиях. Сравнение численных оценок накопленных поврежденностей в материале конструкций, эксплуатирующихся в экстремальных условиях Республики Саха (Якутия) и в условиях умеренного климата Красноярского края Российской Федерации, позволяет сделать вывод, что наработка на отказ в существенной степени определяется климатическими условиями. Разработанная методика оценки накопления повреждений и прогнозирования ресурса элементов металлоконструкций в диапазоне температур вязкохрупкого перехода позволит уменьшить объем необходимых испытаний без потери достоверности информации. Кроме того, с ее помощью можно диагностировать опасные производственные объекты, доступ к которым ограничен.

Ключевые слова: поврежденность; ресурс; низкие температуры; вязкохрупкий переход; сталь; ударная вязкость; трещина; зона термического влияния; потеря пластичности.

ESTIMATION OF THE RELIABILITY OF 09G2S STEEL STRUCTURES OPERATING IN ARCTIC CONDITIONS

© Al'bert V. Grigor'ev, Valerij V. Lepov

Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS, ul'ko Oktyabr'skaya, 1, Yakutsk, 677890, Russia; e-mail: greegor1212@mail.ru

Received December 7, 2018. Revised February 10, 2019. Accepted March 25, 2019.

The data on damage accumulation and service life of the elements of welded metal structures made of 09G2S steel during their operation in the Far North (regions located mainly north of the Arctic Circle) are presented. The mechanism of damage accumulation in steel undergoing a low-temperature ductile-brittle transition was evaluated by measuring the impact toughness of the V-notched specimens (KCV) in the corresponding temperature range. Analysis of experimental data revealed that the most severe loss in the weld plasticity occurs in the heat-affected zone characteristic with stress localization and accelerated accumulation of the defects and crack development resulting in a decrease the lifetime of steel structures at low temperatures. The method for estimating integral damage of steel welded structure subject to a ductile-brittle transition is proposed proceeding from the Kachanov-Rabotnov damage accumulation theory with due regard to the operating time of the material in severe climatic conditions. Comparison of numerical estimates of accumulated damages in the material of the structures operating in extreme conditions of the Republic of Sakha (Yakutia) and in the climate of the Krasnoyarsk Territory of the Russian Federation allows us to conclude that MTBF and lifetime of the structures are largely determined by climatic conditions.

Keywords: damage; lifetime; low temperature; ductile-brittle transition; bcc-steel; impact toughness; crack; heat-affected zone; loss of plasticity.

В процессе эксплуатации крупных стальных металлоконструкций на территории Республики Саха (Якутия) на отдельные элементы, включая сварные соединения, воздействуют циклические динамические нагрузки и происходит ускоренная деградация материала, обусловленная изменением механизма накопления повреждений вследствие низкотемпературного вязкохрупкого перехода в стали. В этой связи особенно актуальными становятся исследования по оценке поврежденности стали в экстремальных условиях эксплуатации и прогнозированию ресурса металлоконструкций.

В процессе накопления повреждений в материале происходят необратимые изменения структуры вследствие движения и размножения дислокаций, процессов появления и слияния вакансий, микродефектов, образования полос скольжения, развития, разрыхления, упрочнения и разупрочнения. Причиной всех этих процессов в основном являются внешние факторы, такие как параметры нагруженности, климатические условия и другие условия эксплуатации. При понижении рабочей температуры в наиболее часто применяемой трубопроводной стали с ОЦК-решеткой происходит вязкохрупкий переход [1], вследствие чего материал подвергается «охрупчиванию», механизм разрушения с вязкого меняется на хрупкий или квазихрупкий.

Цель работы — оценка поврежденности материала элементов крупных металлоконструкций, на которые воздействуют динамические температурные и малоцикловые нагрузки [2]. Согласно постулатам механики разрушения, предполагается, что в результате воздействия нагрузки в материале вокруг имеющихся микродефектов происходят локальные акты разрушения и накапливается поврежденность, величина которой зависит как от механических характеристик, так и от числа циклов, амплитуды и частоты прилагаемых напряжений, рабочих температур и множества других факторов.

Исходя из концепции накопления повреждений Качанова – Работнова [3, 4], а также предполагая автомодельность процессов накопления повреждений в материале, за N циклов малоциклового нагружения получим величину накопленной поврежденности:

$$\Psi = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Psi_{Ln}, \quad (1)$$

где Ψ_{Ln} — поврежденность при малоцикловом нагружении на n -м цикле; N — соответствующий показатель числа циклов.

Поврежденность, вычисляемая согласно (1), должна существенно зависеть от температуры

конструкции ввиду значительного снижения механических характеристик материала, в частности, ударной вязкости, и соответствующей локализации пластических деформаций в зоне зарождения и развития трещины. Ранее авторами было получено выражение для поврежденности в условиях динамического нагружения с учётом вязкохрупкого перехода при низкой температуре эксплуатации [5]:

$$\Psi = \sum_{j=1}^N \int_{T_0}^{T_{эj}} \left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right) dT, \quad (2)$$

где KCV — ударная вязкость материала, Дж/см²; KCV_0 — ударная вязкость при комнатной температуре T_0 ; $T_{эj}$ — температура эксплуатации на j -м участке пути (времени).

Однако можно убедиться, что предложенная зависимость накопления повреждений (2) применима в широком диапазоне нагрузок для оценки выработки ресурса крупных металлоконструкций, изготавливаемых из подверженных низкотемпературному вязкохрупкому переходу сталей с ОЦК-решеткой.

Еще Новожиловым [6] была введена оценка пластического «разрыхления» по остаточному увеличению объема металла, на основе первого инварианта тензора деформации. Таким образом, скалярную поврежденность можно связать с деформацией сдвига:

$$d\varepsilon = \alpha d\Lambda, \quad (3)$$

где $d\varepsilon$ — приращение пластического «разрыхления» элементарного единичного объема материала; $d\Lambda = H dt$ — приращение степени деформации сдвига за малый промежуток времени dt ; α — коэффициент интенсивности накопления и развития трещин, зависящий от материала, напряженного состояния, температуры и скорости деформации, характера нагружения (статическое, малоцикловое, многоцикловое).

Вводя значение предельной деформации сдвига ε_{cr} , соответствующей предельному разрыхлению материала в вершине микротрещины, после которого образуется макроскопическая трещина, инициирующая разрушение, и обозначив $d\Psi = d\varepsilon/\varepsilon_{cr}$, получим

$$d\Psi = \frac{\alpha}{d\varepsilon_{cr}} H dt. \quad (4)$$

Поврежденность Ψ здесь можно понимать как степень использования запаса пластичности

металла [7]. Тогда условие разрушения запишем как

$$\Psi = \int_0^{t_F} \frac{\alpha H d\tau}{\varepsilon_{cr}} = \int_0^{t_F} \frac{H d\tau}{\Lambda_F} = 1, \quad (5)$$

где Λ_F — предельное разрыхление микрообъема материала. Таким образом, физический смысл выражения (5) заключается в достижении величиной пластического «разрыхления» в момент разрушения единицы, после чего происходит образование трещины критического размера и наступает стадия катастрофического разрушения.

Зависимость предельного разрыхления Λ_F от температуры при вязкохрупком переходе будет определяться выражением, аналогичным (2):

$$\Lambda_F(T) = \Lambda_{F0} \left(1 - \frac{KCV(T)}{KCV_0} \right), \quad (6)$$

где Λ_F — предельное разрыхление микрообъема материала при комнатной температуре.

Таким образом, условие разрушения (2) применимо для широкого спектра конструкций и видов нагружения.

Интегральный эффект от множества различных дефектов, растущих и размножающихся на нескольких структурных (масштабных) уровнях в пределах локальной области, может быть учтен зависимостью, выведенной ранее на основе логистического уравнения, или уравнения Ферхюльста, для динамики дефектов дислокационного и недислокационного происхождения, содержащих водород [8, 9]:

$$d\psi/dt = f(T, \sigma)\psi(1 - \psi). \quad (7)$$

В случае малоциклового усталости в широком диапазоне нагрузок и учета приближенного решения (7) [10] условие работоспособности элемента металлоконструкции в условиях низких климатических температур примет следующий вид:

$$\Psi = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \int_{T_0}^{T_{2j}} \left(1 - \frac{KCV_j(T)}{KCV_0} \right)^m dT < 1, \quad (8)$$

где KCV_0 и KCV_j — ударная вязкость при комнатной температуре и в момент j -го повреждения; $m \sim 0,25 - 0,3$ — коэффициент, зависящий от материала и вида НДС. Таким образом, выражение (8) может служить приближенной оценкой поврежденности в условиях низких климатических температур для сталей, подверженных вязкохрупкому переходу и испытывающих потерю запаса пластичности.

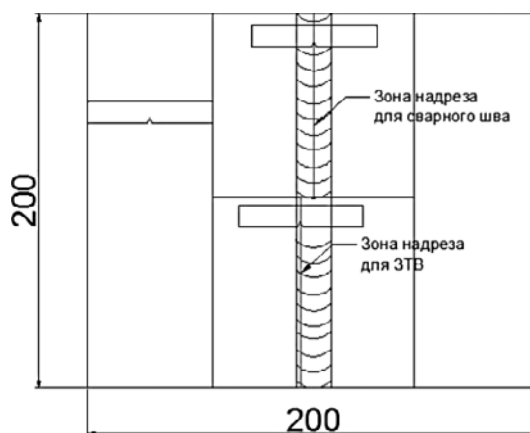


Рис. 1. Схема вырезки образцов

Fig. 1. The scheme of cutting samples

Достижение поврежденностью значения $\Psi = 1$ будет соответствовать предельному состоянию материала и определять момент выработки ресурса элементом конструкции.

Методика и результаты эксперимента

Для экспериментальных исследований использовали стандартную методику оценки ударной вязкости образцов с V-образным надрезом, которые изготавливали из металла сварного шва (МШ), зон термического влияния (ЗТВ) и основного металла (ОМ) (рис. 1).

На рис. 2, а представлены экспериментальные данные (точки) и зависимость (кривая) ударной вязкости материала из ЗТВ от температуры после сплайновой аппроксимации. Аналогичные результаты, полученные на образцах из зон МШ и ОМ, и соответствующие кривые аппроксимации представлены на рис. 2, б и в.

Согласно результатам испытаний [11], ударная вязкость KCV в ЗТВ и МШ при температуре испытаний, равной -60°C , существенно снижается. Следовательно, при температуре ниже -20°C (минимально рекомендованная температура для этой стали -70°C) материал ЗТВ и МШ претерпевает вязкохрупкий переход и энергия, необходимая для его разрушения, существенно падает. Вследствие этого снижается сопротивление материала действию нагрузок и происходит ускоренное накопление структурных повреждений, обусловленное локализацией деформаций и образованием микротрещин.

Уменьшение KCV при низких температурах испытаний обусловлено ухудшением способности материала высвобождать энергию пластических деформаций. При этом KCV коррелирует с J_c , поэтому физическим смыслом последней становится вязкость разрушения. При равных значениях температуры такая связь ранее была по-

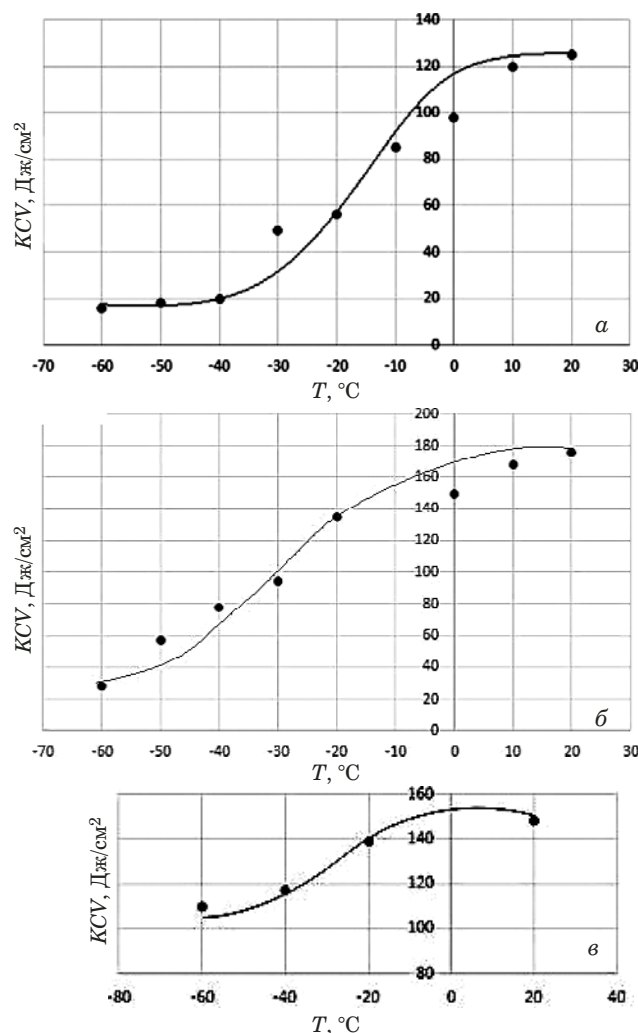


Рис. 2. Зависимости ударной вязкости KCV стали 09Г2С в зонах термического влияния (а), металла шва (б), основного металла (в) от температуры

Fig. 2. Temperature dependences of the impact toughness of the V-notched specimens KCV of steel 09G2S in the heat affected zones (a), weld metal (b), and base metal (c)

лучена экспериментально [12] для высокопрочной жаростойкой стали.

Расчет поврежденности конструкций в различных климатических зонах

В рамках исследований проведено сравнение климатических условий эксплуатации в различных территориальных зонах Республики Саха (Якутия). На рис. 3 представлены усредненные по месяцам значения температур за 2017–2018 гг. в поселке Оймякон, который относится к Арктической зоне Республики Саха (Якутия), и в городе Ленск, расположенном в Юго-Западной субарктической части Республики.

Из анализа зависимостей следует, что перепады температуры окружающей среды в среднем составляют более 60°C . Если сопоставить значения ударной вязкости, полученные в результате

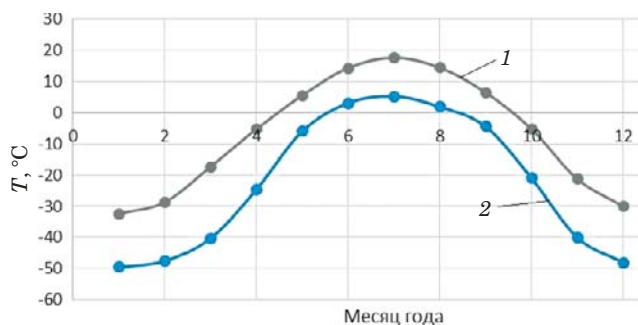


Рис. 3. Усредненные значения температуры окружающей среды по месяцам в климатических условиях г. Ленска (1) и п. Оймякон (2)

Fig. 3. Average monthly values of the ambient temperature in climatic conditions of Lensk (1) and Oymyakon (2)

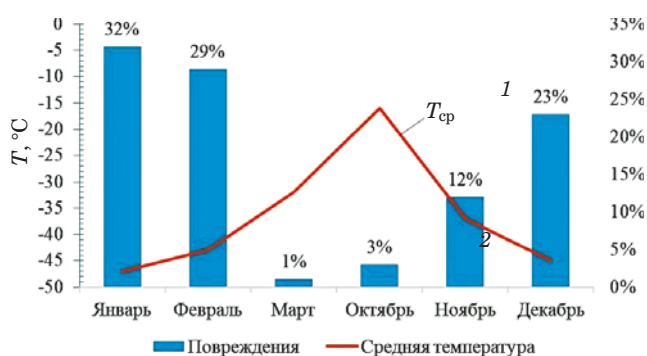


Рис. 4. Распределение средней температуры ($T_{ср}$), а также количества аварий и повреждений по месяцам

Fig. 4. Monthly distribution of the average temperature (T_{av}) and the number of accidents and damages

вышеописанных испытаний на ударный изгиб, с данными по температуре, то можно увидеть, что в зимнее время элементы металлоконструкций испытывают большие температурные напряжения, т.е. подвергаются большой опасности. В зимний период года количество повреждений крупных металлоконструкций резко возрастает — более половины разрушений приходится на декабрь и январь (рис. 4) [13].

Значения минимальных температур окружающей среды в Арктической зоне отрицательные, в основном ниже -20°C , что обуславливает пониженные значения ударной вязкости материала элементов металлоконструкций в больший период эксплуатации. На рис. 5 представлены распределения расчетных значений ударной вязкости образцов, изготовленных из металла шва, зоны термического влияния и основного металла элементов металлоконструкций из стали 09Г2С, по средним температурам календарного месяца.

В зимний период ударная вязкость образцов, изготовленных из основного металла, сохраняется на достаточно высоком уровне, а образцов, представляющих ЗТВ и МШ, существенно сни-

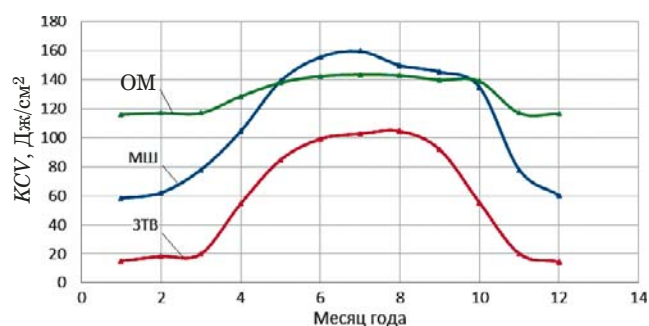


Рис. 5. Распределение значений KCV по средним температурам календарного месяца

Fig. 5. KCV dependence on the average temperatures of the calendar month

жается. На рис. 6 для сравнения приведены значения ударной вязкости материалов ЗТВ и МШ для разных климатических зон эксплуатации на территории Республики Саха (Якутия).

Согласно полученным результатам, для одного и того же материала в зависимости от климатической зоны эксплуатации на территории Республики Саха (Якутия) будут наблюдаться различные значения ударной вязкости и соответствующий условиям окружающей среды уровень поврежденности элементов металлоконструкций.

Расчет поврежденностей, накапливаемых в ЗТВ и МШ стали 09Г2С, с учетом влияния низких температур эксплуатации на снижение пластичности согласно (8) позволил получить следующие значения: для зоны Оймякон $\Psi = 0,928$; для Ленского района $\Psi = 0,751$ (рис. 7).

Для сравнения вычисляли поврежденность по (2) для общедоступных климатических условий Красноярска. Полученная величина $\Psi = 0,5881$ оказалась существенно ниже оценок поврежденности для территорий Республики Саха (Якутия), относимых к зонам Арктики и Субарктики. Реальные же повреждения вследствие более жестких условий эксплуатации, увеличенного количества зародышевых микротрещин и начальных микродефектов в сварных швах и зоне термического влияния будут отличаться еще в большей степени.

Таким образом, поврежденность элементов металлоконструкций, подвергающихся малоцикловой усталости в экстремальных климатических условиях, за указанный период почти достигает предельных значений, а их ресурс вырабатывается значительно раньше, чем при эксплуатации в условиях более умеренного климата средней полосы России.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных и расчетных исследований предложен

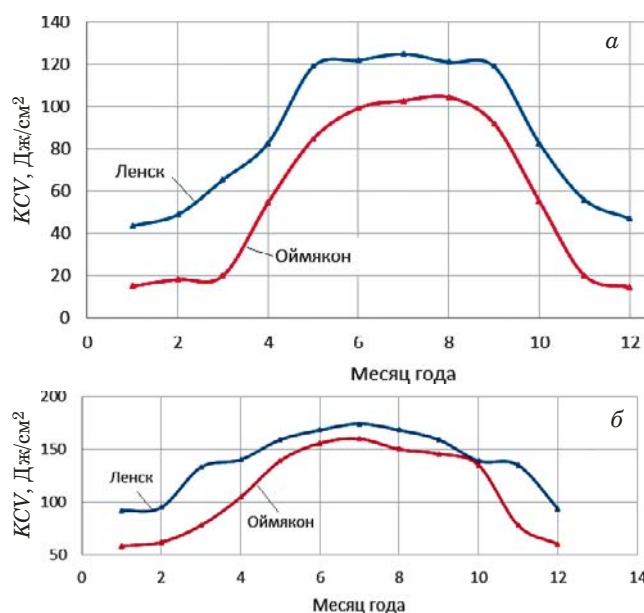


Рис. 6. Распределение KCV материалов ЗТВ (а) и МШ (б) по месяцам

Fig. 6. Monthly changes in KCV of the metal from heat affected zone (a) and weld metal (b)

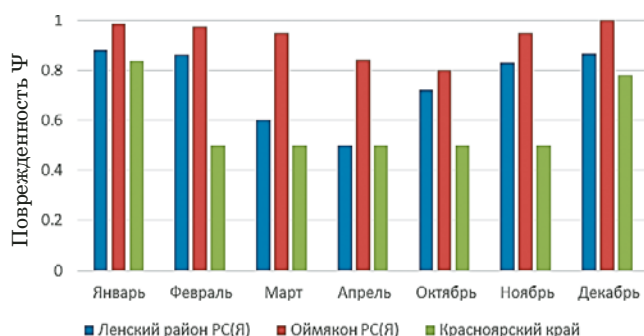


Рис. 7. Распределение поврежденности материала металлоконструкций по месяцам при различных климатических условиях

Fig. 7. Monthly change in the metal damage under different climatic conditions

критерий поврежденности Ψ , учитывающий изменение механизма накопления повреждений в результате вязкохрупкого перехода, обусловленного экстремальными климатическими условиями эксплуатации стальных конструкций. Предложен подход, при котором с помощью численной аппроксимации рассчитаны значения ударной вязкости, соответствующие минимальным температурам региона по календарным месяцам. С помощью него можно прогнозировать рост накопленных повреждений и снижение ресурса эксплуатируемых металлоконструкций в зависимости от климатических условий.

Рассчитана накопленная поврежденность материала металлоконструкции, изготовленной из

стали 09Г2С, с учетом влияния низких температур на снижение пластичности. Установлено, что в регионах с умеренным климатом накопленная поврежденность почти в два раза ниже, чем на территории Крайнего Севера.

В условиях низких климатических температур на процесс накопления общей поврежденности Ψ значительное влияние оказывает снижение пластичности материала, измеряемое величиной его ударной вязкости. При этом напряженно-деформированное состояние элементов металлоконструкций становится более жестким вследствие низких температур эксплуатации, при которых в применяемых сталях с ОЦК-решеткой происходит вязкохрупкий переход.

Несмотря на достоверность оценки ресурса для элементов железнодорожного транспорта [14], прогнозирование надежности состояния металла объектов повышенной опасности при эксплуатации в условиях низких климатических температур требует дополнительных исследований. Предложенная методика оценки ударной вязкости и прогнозирования ресурса элементов металлоконструкций в диапазоне температур вязкохрупкого перехода позволит уменьшить объем необходимых испытаний без потери достоверности, а в некоторых случаях — получить информацию, недоступную ранее из-за ограниченного доступа к опасному производственному объекту.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Большаков А. М., Иванов А. Р.** Исследования на малоцикловую усталость как имитация накопления поврежденности гладких образцов из конструкционной стали / Материалы XIV междунар. научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасности эксплуатации материалов», г. Санкт-Петербург, 28 – 29 октября 2008 г. С. 231 – 232.
2. **Качанов Л. М.** Основы механики разрушения. — М.: Наука, 1974. — 312 с.
3. **Работнов Ю. Н.** Введение в механику разрушения. — М.: Наука, 1987. — 80 с.
4. **Гиренко В. С., Котенков Э. В.** Зависимости между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных сталей и их сварных соединений / Автоматическая сварка. 1985. № 9. С. 13 – 20.
5. **Григорьев А. В., Лепов В. В.** Оценка ресурса железнодорожной техники, эксплуатируемой в экстремальных условиях Севера / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 12. С. 42 – 48.
6. **Новожилов В. В.** О пластическом разрыхлении / Прикладная математика и механика. 1965. № 4. С. 681 – 689.
7. Пластичность и разрушение / Под ред. В. Л. Колмогорова. — М.: Металлургия, 1977. — 366 с.
8. Соппротивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие. Ч. 2. / Отв. редактор В. Трошенко. — Киев: Наукова думка, 1994. — 701 с.
9. **Архангельская Е. А., Лепов В. В., Ларионов В. П.** Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды / Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 4. С. 81 – 87.
10. **Lepov V. V.** Structural evolution modeling of damage accumulation processes in modern metallic and polymer nanomaterials / World Journal of Engineering. 2012. Vol. 10. N 5. P 205 – 212.
11. **Санников И. И., Коврова Д. Ф., Устинов Е. П.** Исследование ударной вязкости конструкционных сталей и сварных соединений, эксплуатирующихся в условиях Крайнего Севера / Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 6(37). Ч. 1. С. 71 – 74.
12. **Чернов В. М., Ермолаев Г. Н., Леонтьева-Смирнова М. В.** Вязкость разрушения хромистой (12 %) ферритно-мартенситной стали ЭК-181 при нагружении на сосредоточенный изгиб / Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 7. С. 72 – 77.
13. **Большаков А. М., Голиков Н. И., Сыромятникова А. С., Алексеев А. А., Литвинцев Н. М., Тихонов Р. П.** Разрушения и повреждения при длительной эксплуатации объектов нефтяной и газовой промышленности / Газовая промышленность. 2007. № 7. С. 89 – 91.
14. **Григорьев А. В., Лепов В. В., Прокопьев Л. А.** Расчет ресурса железнодорожного колеса в условиях низких климатических температур. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615751. 2018.

REFERENCES

1. **Bolshakov A. M., Ivanov A. R.** Low-cycle Research of Structural Steel Smooth Samples as an Imitation of Damage Accumulation / XIV International Scientific and Technical Conference “Problems of resource and safe use of materials”, St. Petersburg, October 28 – 29, 2008. P. 231 – 232 [in Russian].
2. **Kachanov L. M.** Introduction to continuum damage mechanics. — Dordrecht: Nijhoff, 1986. — 135 p.
3. **Rabotnov Yu. M.** Introduction to fracture mechanics. — Moscow: Nauka, 1987. — 80 p. [in Russian].
4. **Girenko V. S., Kotenkov E. V.** Dependences between the impact toughness and fracture mechanics criteria for structural steels and weld joints / Avtomat. Svarka. 1985. N 9. P. 13 – 20 [in Russian].
5. **Grigoriev A. V., Lepov V. V.** Lifetime Estimation of Railroad Equipment Operated in the Extreme North Conditions / Zavod. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 12. P. 42 – 48 [in Russian].
6. **Novozhilov V. V.** About plastic loosening / Prikl. Matem. Informatika. 1965. Vol. 29. Issue 4. P. 681 – 689 [in Russian].
7. Plasticity and fracture / V. L. Kolmogorov, ed. — Moscow: Metallurgiya, 1977. — 366 p. [in Russian].
8. Material Stress-strain Resistance: Reference book. Part 2 / V. Troschenko, ed. — Kiev: Naukova dumka, 1994. — 701 p. [in Russian].
9. **Arkhangelskaya E. A., Lepov V. V., Larionov V. P.** Connected Model of Delayed Fracture of the Damaged Media / Fiz. Mezomekh. 2001. Vol. 4. N 4. P. 81 – 87 [in Russian].
10. **Lepov V. V.** Structural evolution modeling of damage accumulation processes in modern metallic and polymer nanomaterials / World Journal of Engineering. 2012. Vol. 10. N 5. P. 205 – 212 [in Russian].
11. **Sannikov I. I., Kovrova D. F., Ustinov E. P.** Study of Impact Toughness of Structural Steel and Weld Joints Operated in the Far North Conditions / Mezhdunar. Nauch.-Issled. Zh. 2015. N 6(37). Part 1. P. 71 – 74 [in Russian].
12. **Chernov V. M., Yermolayev G. N., Leont'yeva-Smirnova M. V.** Fracture Toughness of Chromium (12%) Ferritic-Martensite Steel EK-181 under the Concentrated Bending Loading / Zh. Tekhn. Fiz. 2010. Vol. 80. N 7. P. 72 – 77 [in Russian].
13. **Bol'shakov A. M., Golikov N. I., Syromyatnikova A. S., Alekseyev A. A., Litvintsev N. M., Tikhonov R. P.** Failure and Damage of Oil and Gas Industry Projects after the Continuous Service / Gaz. Promyshl. 2007. N 7. P. 89 – 91 [in Russian].
14. **Grigorev A. V., Lepov V. V., Prokopyev L. A.** Lifetime Estimation of Railroad Wheel at Low Temperature Conditions/ Certificate of state registration of a software. N 2018615751. 2018 [in Russian].