



Оригинальная статья

Анализ повреждений рельсовой стали после эксплуатации в условиях Центральной Якутии

**Иван Иванович Дьячковский, Валерий Валерьевич Лепов[✉],
Валентина Семеновна Ачикасова, Альберт Викторович Григорьев**

*Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН –
обособленное подразделение ФИЦ «ЯНЦ СО РАН»,
г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, 677980, Российская Федерация
[✉]lepov@iptpn.ysn.ru*

Аннотация

Эксплуатация железной дороги в субарктической климатической зоне Центральной Якутии способствует ускоренной выработке ресурса и разрушению рельса и бандажа локомотивного колеса. Представлен анализ деградации микроструктуры испытанных на ударную вязкость образцов, изготовленных из участка рельса на разном удалении от поверхности катания. Рельс находился в активной эксплуатации на железнодорожном участке Томмот–Якутск в зимний период времени. Морфологический анализ поверхностей изломов образцов из рельсовой стали с помощью сканирующей туннельной микроскопии выявил неоднородность микроструктуры, которая обуславливает изменение механических свойств, ускоренное возникновение пор и трещин и накопление повреждений при эксплуатации. Получены данные по морфологии, структуре и элементному составу материала в зонах утяжки вблизи поверхностей разрушения, выявлены микромеханизмы разрушения, разработан алгоритм оценки ресурса на основе теории накопления структурных повреждений, выявлены особенности вязко-хрупкого разрушения, включая закономерности роста пор и трещин, неоднородность накопления повреждений и ускоренную деградацию механических свойств. Цель работы состояла в выявлении зависимости структурных изменений рельсовой стали при эксплуатации в условиях Севера от динамики характеристик стали путем выявления аналитической связи между поврежденностью материала и критерием разрушения Гриффитса. Для выявления неоднородности зерен в металле применена оптическая и сканирующая туннельная микроскопия, выполнен анализ теоретических моделей накопления повреждений и показано, что нелинейная модель Леметра–Шабоша учитывает зависимость скорости деградации материала от состояния структуры. Определена связь между параметром поврежденности, критерием Гриффитса и пределом перколяции среды. Полученные фундаментальные результаты имеют прикладное значение для оценки технического состояния и ресурса металлоконструкций, создания цифровых двойников сложных технических систем, эксплуатирующихся в экстремальных климатических условиях.

Ключевые слова: рельсовая сталь, микроструктура, накопление повреждений, СТМ, критерий Гриффитса, закон Холла–Петча, предел перколяции, ресурс работы

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Программы ФНИ государственных академий наук (проект № FWRS-2024-0035).

Благодарности. Авторы выражают благодарность ЦКП ЯНЦ СО РАН за предоставление возможности использования научного оборудования, сотрудникам Отдела 40 ИФТПС СО РАН (зав. отдела к.т.н., с.н.с. М.И. Васильева) за помощь в подготовке образцов.

Для цитирования: Дьячковский И.И., Лепов В.В., Ачикасова В.С., Григорьев А.В. Анализ повреждений рельсовой стали после эксплуатации в условиях Центральной Якутии. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(2):333–343. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-333-343> EDN: YAQLHM

Damage analysis of rail steel operated in the extreme climate of Central Yakutia

Ivan I. Dyachkovsky, Valeriy V. Lepov✉, Valentina S. Achikasova,
Albert V. Grigoriev

Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences – Division of Federal Research Center
“The Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”,
1, Oktyabrskaya St., Yakutsk, Russian Federation, 677980
✉lepov@iptpn.ysn.ru

Abstract

Railroad operation in the subarctic climate of Central Yakutia contributes to accelerated service life exhaustion and fracture of rails and locomotive wheels. This paper presents an analysis of microstructural degradation in Charpy impact test specimens made from a rail section at various distances from the rolling surface. The rail was in active service on the Tommot-Yakutsk railway section during the winter season. Morphological analysis of fracture surfaces of rail steel specimens using scanning tunneling microscopy revealed microstructural heterogeneity, which causes changes in mechanical properties, accelerated pore and crack formation, and damage accumulation during operation. Data on the morphology, structure, and elemental composition of the material in stress zones near fracture surfaces were obtained. The aim of this work was to identify the relationship between the nature of structural changes in rail steel during operation in northern conditions and the patterns of change in steel characteristics by establishing an analytical relationship between material damage and the Griffiths destruction criterion. Fracture micromechanisms were identified. A service life assessment algorithm based on the theory of structural damage accumulation was developed. The characteristics of ductile-brittle fracture were identified, including patterns of pore and crack growth, heterogeneity of damage accumulation, and accelerated degradation of mechanical properties. Optical and scanning tunneling microscopy were used to identify grain heterogeneity in the metal. An analysis of theoretical damage accumulation models was performed, and it was demonstrated that the nonlinear Lemaitre-Chabosche model accounts for changes in the material degradation rate depending on the structural state. The relationship between the damage parameter, the Griffiths criterion, and the percolation limit of the medium was determined. These fundamental results have practical applications in assessing the technical condition and service life of metal structures and in creating digital twins of complex technical systems operating in extreme climatic conditions.

Keywords: rail steel, microstructure, damage accumulation, STEM, Griffith criterion, Hall-Petch law, percolation limit, service life

Funding. This research was conducted within the framework of the Program of the Scientific Research Fund of the State Academies of Sciences (project No. FWRS-2024-0035).

Acknowledgements. The authors wish to express their sincere gratitude to the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Center “The Yakut Scientific Center SB RAS” for access to equipment, and to the staff of Department 40 of Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North SB RAS, especially Head of Department, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Maria I. Vasilyeva for their valuable assistance with sample preparation.

For citation: Dyachkovsky I.I., Lepov V.V., Achikasova V.S., Grigoriev A.V. Damage analysis of rail steel operated in the extreme climate of Central Yakutia. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(2):333–343. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-333-343> EDN: YAQLHM

Введение

Для оценки скорости снижения механических характеристик от эксплуатационных факторов, с целью разработки методов повышения долговечности стальных конструкций в экстремальных условиях Севера и Арктики исследуются механизмы накопления повреждений на различных масштабных уровнях. Оценка накопленных

повреждений, их качественная характеристика и количественная параметризация осуществляются с помощью оптического и электронно-микроскопического анализа микроструктуры, морфологии поверхностей разрушения образцов, полученных из элементов конструкций после проведения испытаний при различных температурах. Таким образом выявляются тип

разрушения и закономерности процесса накопления повреждений в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации [1–5].

Процесс разрушения поврежденных материалов как сред с изменяющейся неоднородной микроструктурой еще не изучен в полной мере, поведение в них трещин отличается от установленного для изотропных однородных структур, включая как форму зарождающихся трещин [2] и динамику их дальнейшего роста и слияния [3], так и статическое и усталостное нагружение [4, 5]. Закономерности накопления повреждений в таких материалах выявляются посредством анализа поверхностей разрушения и деформации методами оптической фрактографии и сканирующей электронной микроскопии [6–8].

На начальных стадиях эксплуатации в поверхностном слое рельса происходят измельчение перлитных зерен и накопление дислокаций. По мере увеличения пропущенного тоннажа наблюдаются фрагментация пластинчатого цемента, формирование субзеренных границ и постепенное образование «белого слоя», зоны с повышенными твердостью и хрупкостью. После пропуска около 2,5 млрд т брутто структурный ресурс поверхностного слоя считается практически исчерпанным [9]. Аналогичные данные получены при изучении эволюции тонкой структуры дифференцированно закаленных рельсов: процессы разрушения перлита и накопления дефектов решетки при низких температурах ускоряются, что приводит к сокращению фактического срока службы [10].

Экстремальные условия эксплуатации способствуют деградации металла конструкций совокупностью воздействующих факторов, включая снижение пластичности и повышение склонности к хрупкому разрушению при низких температурах, сложное многоосное напряженно-деформированное состояние от контактных напряжений колесо–рельс и воздействия суточных и сезонных перепадов температур. Интенсивность накопления микроповреждений в таких условиях приводит к ускоренному накоплению повреждений на поверхности рельса и контактному износу: расчетный ресурс рельсов сокращается на 20–30 % по сравнению со стандартными нормативами [11].

Следует отметить, что структурная неоднородность рельсовой стали проявляется на нескольких масштабных уровнях: на макроуровне в виде неравномерности распределения твердости по сечению рельса, на мезоуровне как не-

однородность перлитных колоний и на микроуровне в виде неметаллических включений, скоплений дислокаций, микропор и микротрещин у границ зерен и включений.

Для выявления и количественной оценки неоднородности поверхности рельса и образцов, испытанных на ударную вязкость, применены методы оптической и электронной микроскопии. При этом методы электронной растровой и сканирующей туннельной микроскопии (РЭМ и СТМ) обеспечивают намного более высокое разрешение и позволяют выявлять и количественно характеризовать морфологию включений, неоднородность структуры, коррелирующую с накоплением повреждений, а также выявлять микротрещины и дислокационные структуры непосредственно на поверхности разрушения для дальнейшей оценки степени поврежденности металла [12, 13].

Низкие температуры ускоряют неоднородность и деградацию структуры стали под действием различных неблагоприятных факторов.

Цель работы состояла в выявлении многоуровневого и взаимосвязанного характера структурных изменений рельсовой стали при эксплуатации в условиях Севера путем анализа закономерностей и механизма изменения характеристик стали и установления аналитической связи между поврежденностью материала и критерием Гриффитса.

Материалы и методы

Исследуемый материал представляет собой высокоуглеродистую рельсовую сталь (предположительно марки 76Ф по ГОСТ Р 51685-2013 «Рельсы железнодорожные»), которая эксплуатировалась в климатических условиях Центральной Якутии на участке Томмот–Якутск. Химический состав стали определен на спектрометре FOUNDRY-MASTER UVR (изготовитель WAS AG, Германия) и представлен в табл. 1.

В исходном состоянии структура стали является перлитной, по составу высокоуглеродистой доэвтектоидной, обладающей оптимальным соотношением прочностных и пластических свойств для нормальных условий эксплуатации (табл. 2). Однако под действием длительных циклических нагрузок и температурных перепадов в условиях перехода через ноль изменение структуры вызывает деградацию механических свойств и ускоренное накопление необратимых повреждений [9, 14].

Таблица 1
Химический состав рельсовой стали

Table 1
Chemical composition of the rail steel

Элемент	Содержание, %
C	0,80
Si	0,31
Mn	0,98
Cr	0,06
Ni	0,07
P	0,01
S	0,01
Mo	0,02
Cu	0,13

Таблица 2
Механические свойства рельсовой стали
(категория рельсов ДТ350)

Table 2
Mechanical properties of the rail steel
(категория рельсов ДТ350)

Характеристика	Значение
Временное сопротивление, Н/мм ²	1180
Предел текучести, Н/мм ²	800
Относительное удлинение, %	9,0
Относительное сужение, %	25,0
Ударная вязкость (–60 °С), КСУ, Дж/см ²	15

По результатам исследований проведены ударные испытания образцов, полученных из металла областей, прилегающих к центральной части поверхности рельса (рис. 1).

Один тип образцов был подготовлен (согласно ГОСТ 9454-2025) для определения механических

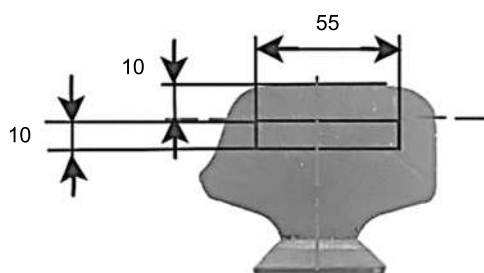


Рис. 1. Схема вырезки и размеры образцов для ударных испытаний из головки рельса (мм)

Fig. 1. Scheme of cutting and specimen sizes for Charpy tests taken from the rail head (mm)

свойств и усталостного поведения рельса при различных температурах испытаний (рис. 2, а).

В соответствии с ГОСТ 25.506-85 «Методы механических испытаний металлов», образцы для испытания на трещиностойкость были вырезаны в форме параллелепипеда со сторонами 55 × 10 × 10 мм. Эти испытания проводились на инструментированном маятниковом копре «Amsler RKP-450» (изготовитель «Zwick Roell», Германия). Испытания проводились при комнатной температуре в окружающем воздухе. На образцы нанесен V-образный надрез глубиной 2 мм, предназначенный для концентрации напряжений. Вид образцов после испытаний показан на рис. 2, б.

Оптическая и электронная сканирующая туннельная микроскопия зон пластической деформации

Для исследования микромеханизмов накопления повреждений методами оптической (Neophot 32) и электронной сканирующей микроскопии в туннельном режиме (СММ-2000) (рис. 3–5) проведен микроструктурный анализ зон утяжки пластической деформации у поверхности излома испытанных на ударный изгиб образцов из рельсовой стали.

Для исследования процессов, происходящих в вершине трещины, после механических испытаний производится оценка величины остаточной пластической деформации по форме зерен. Фрактография изломов позволяет оценить характер разрушения, наличие поверхностей хрупкого скола и вязкого отрыва, тогда как боковые поверхности образца вблизи трещины отражают состояние остаточной пластической деформации.

На изображениях, полученных в оптическом микроскопе (Neophot-32 (Carl Zeiss, Германия) (см. рис. 3, 5, а и б), ярко-белые зоны соответствуют ферритным доменам, а темно-серые – скоплениям перлита. Ферритные домены имеют неправильную вытянутую форму, тогда как перлитные в целом более равноосны, выраженной полосчатой структуры зерен и доменов не наблюдается, заметной разницы не показали и зерна, ориентированные перпендикулярно или параллельно оси образца [8].

На изображениях, полученных с помощью сканирующего зондового мультимикроскопа СММ-2000 (производство завода «Протон-МИЭТ», Россия), в туннельном режиме видны отчетливый контраст и более высокое пространственное разрешение (см. рис. 4 и рис. 5, в, г).

При накоплении достаточного количества данных по поверхностям разрушения возможно построение как аналитических, так и численных моделей, основанных в том числе и на стохастических алгоритмах, для оценки скорости роста и траектории развития трещины по распределению дефектов и пор в материале, выявления микромеханизмов разрушения.

Рост пор описывается по вязкому механизму слияния с основной трещиной путем образования множества разрозненных зон повреждений; трещины при хрупком разрушении распространяются более прямолинейно, и внутренняя структура материала в меньшей степени определяет их рост. Численное моделирование позволяет визуализировать и предсказывать рост трещины, количественно характеризуя скорость и вероятность разрушения. Однако для инженерных расчетов требуется получение соотношений, применимых на практике и в моделях механики разрушения при численной реализации методом конечных элементов, что требует предварительной разработки соответствующей теоретической модели.

Описание теоретической модели

Классической основой для описания усталостных повреждений служит гипотеза линейного суммирования повреждений Пальмгрена–Майнера, согласно которой повреждения суммируются независимо, а разрушение наступает при условии

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (1)$$

где D – уровень накопленных повреждений, n_i – число циклов при i -м уровне нагружения, N_i – число циклов до разрушения при том же уровне напряжений. Соотношение (1) широко используется в инженерной практике, однако его существенным недостатком является отсутствие учета разнородности нагружения и структурной неоднородности материала [16].

Нелинейные модели накопления повреждений, например, модель Леметра–Шабоша, основанная на термодинамике необратимых процессов, позволяет учитывать зависимость скорости накопления повреждений от текущего состояния материала:

$$\frac{dD}{dN} = \left[\frac{\Delta\sigma/2}{M_0(1-D)} \right]^\beta, \quad (2)$$

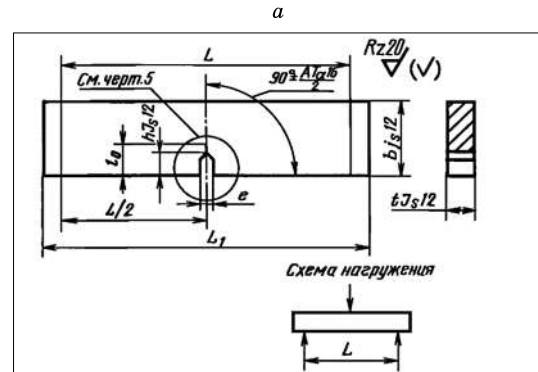


Рис. 2. Геометрия, размеры образцов [15] (а) и вид после испытаний (б)

Fig. 2. Shape and dimensions of samples [15] (a), appearance after testing (b)

где $\Delta\sigma$ – размах напряжений, M_0 – предел выносливости, β – параметр структуры материала, N – число циклов. Суммирование (2) может производиться по блокам нагружения, на каждом из которых свойства материала M_0 и β меняются, ускоряя процесс накопления повреждений по мере деградации структуры. Принимая $dt = dN \cdot \delta t$, где δt – время действия цикла нагружения dN , получим оценку накопленной поврежденности D , достижение значения D_{cr} которой будет означать выработку ресурса:

$$D = \int_0^T \left[\frac{\Delta\sigma(t)/2}{M_0(t) \cdot (1-D)} \right]^{\beta(t)} dt = D_{cr}, \quad (3)$$

где T – расчетный ресурс работы. $M_0(t)$ определяется скоростью деградации структуры, $\beta(t)$ – ее неоднородностью; эти характеристики оцениваются по числу циклов и изменению размера

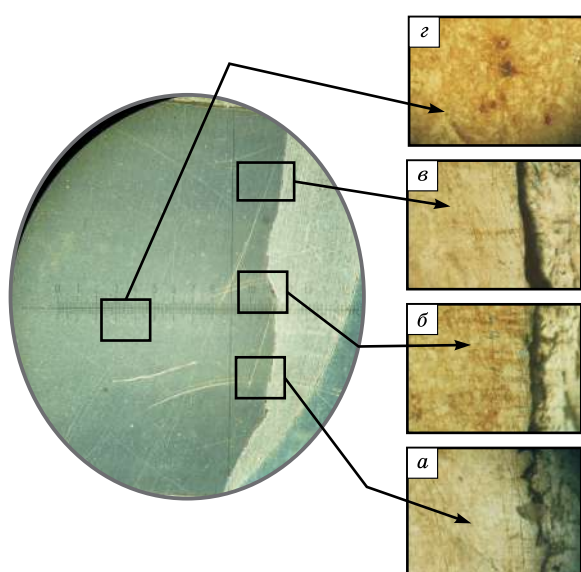


Рис. 3. Схема исследования на оптическом микроскопе поверхности утяжки ударных образцов из материала рельса: *а* – зона надреза, *б* – центральная зона, *в* – зона долома, *г* – исходный недеформированный материал

Fig. 3. Scheme of optical microscope study of the tightening surface of impact samples prepared from rail steel: (*a*) notch zone; (*б*) central zone; (*в*) fracture zone; (*г*) predominantly slightly deformed or undeformed material

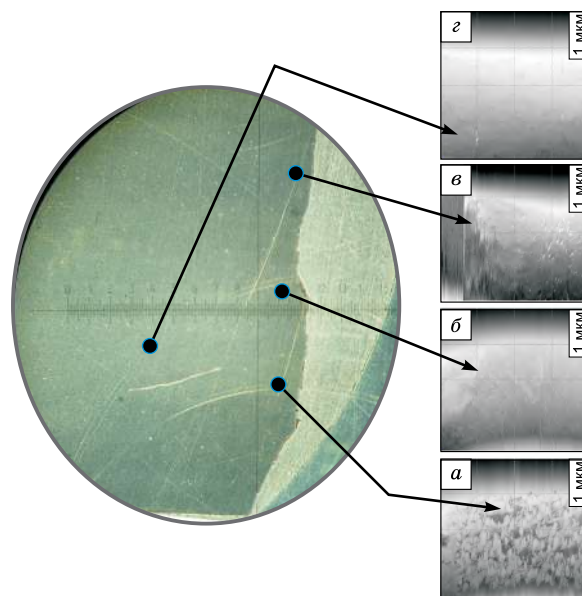


Рис. 4. Схема исследования на СТМ боковой поверхности утяжки образцов из материала рельса: *а* – зона надреза, *б* – центральная зона, *в* – зона долома, *г* – исходный недеформированный материал. Увеличение $\times 40\,000$

Fig. 4. Scheme of scanning electron microscope (SEM) study of the tightening surface of rail impact specimens: (*a*) notch zone; (*б*) central zone; (*в*) fracture zone; (*г*) predominantly slightly or negligibly deformed material ($\times 40,000$)

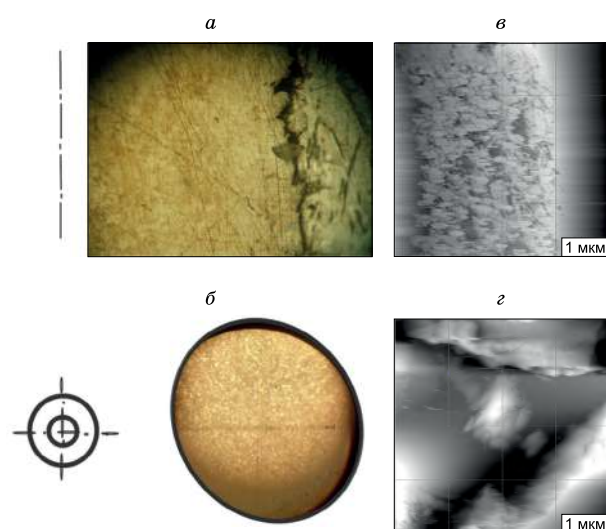


Рис. 5. Изображения поверхностей утяжки в поперечном (*а*, *в*) и продольном (*б*, *г*) сечениях, полученные с помощью оптической (*а*, увеличение $\times 200$, и *б*, увеличение $\times 56$) и электронной сканирующей туннельной микроскопии (*в*, *г*, увеличение $\times 40\,000$)

Fig. 5. Images of the tightening surfaces in transverse and longitudinal sections obtained using: optical microscopy ((*a*) $\times 200$; (*б*) $\times 56$); and scanning electron microscopy ((*в*) transverse section; (*г*) longitudinal section; $\times 40,000$).

зерен или доменов под поверхностью рельса и в зонах утяжки ударных образцов.

Неоднородность структуры является источником концентраций напряжений на микроуровне: у неметаллических включений, на границах зерен с различной ориентировкой, в зонах перехода между перлитом и белым слоем формируются первичные микротрещины [17]. Структурный подход к моделированию связан с многомасштабным описанием эволюции дефектов и позволяет учитывать этот процесс для корректировки оценки ресурса [18].

Интегрирование уравнения от $D = 0$ до $D = D_{cr}$, где $D_{cr} = 0,8$, принималось как критическое значение повреждения, соответствующее инициированию трещины длиной порядка 10–15 мкм, позволило получить оценочное число циклов до достижения критического состояния для групп образцов из поврежденного при эксплуатации в условиях Центральной Якутии и в стандартных условиях металла (табл. 3).

Следует отметить, что поврежденность материала и критерий Гриффитса находятся в обратной функциональной зависимости, которая определяет снижение критического напряжения

разрушения по мере накопления микротрещин в структуре стали. Аналитическое выражение этой связи может быть получено из предположения, что с каждым приращением параметра поврежденности dD эффективная длина микротрещины растет на величину, пропорциональную текущему размеру дефекта. Тогда эффективная длина магистральной трещины l_{cr} становится функцией поврежденности: $l_{cr} = l_0(1 - D)^{-\alpha}$, где l_0 – начальный размер критического дефекта, α – показатель, характеризующий геометрию развития дефектной сети.

Подставляя это соотношение в критерий Гриффитса, получаем:

$$\sigma_{cr}(D) = \sigma_{cr0}(1 - D)^{\alpha/2}, \quad (4)$$

где σ_{cr} – критическое напряжение разрушения при отсутствии повреждений; D – поврежденность; α – коэффициент, зависящий от морфологии дефектной структуры. Это выражение показывает, что даже при малых значениях D критическое напряжение падает, однако наиболее резкое снижение происходит при приближении D к единице.

Для ферритной стали при квазистатическом нагружении экспериментальные данные указывают на значения α в диапазоне 1,5–2,5. Таким образом, механизм разрушения необходимо описывать модифицированным критерием Гриффитса с учетом роста микротрещин, размер которых далек от критического. Накопленная поврежденность увеличивает вероятность соединения отдельных микротрещин в единую магистральную трещину с меньшей требуемой движущей силой для ее распространения. Механические характеристики стали деградируют по степенному закону, а не линейно, что критически важно для предсказания момента полного разрушения.

Если снижение размера зерна, согласно зависимости Холла–Петча, увеличивает предел текучести и начальную прочность материала, то накопление повреждений при деформировании снижает критическое напряжение разрушения согласно (4). В частности, изменение механических характеристик материала может быть выражено через модуль упругости, который чувствителен к обоим факторам:

$$E(D, d) = E_0(1 - D) \left(1 + \frac{k_E}{\sqrt{d}} \right), \quad (5)$$

где E_0 – исходный модуль Юнга материала без повреждений и при начальном размере зерна;

Таблица 3

Расчетные показатели скорости накопления повреждений согласно (2)

Table 3
Damage accumulation parameters according to (2)

Параметр	Стандартные условия	Экстремальные условия
Значение M_0 , МПа	420	310
Параметр структуры материала β	7,2	7,2
Критический уровень повреждений D_{cr}	0,8	0,8
Расчетное число циклов до D_{cr} , млн	210	148
Скорость накопления повреждений	1,0	1,42

D – параметр поврежденности; d – размер зерна; k_E – коэффициент, связанный с механизмом деформационного упрочнения для данного материала. Для предела текучести выражение аналогично (5):

$$\sigma_y(D, d) = \sigma_{y0}(1 - D) \left(1 + \frac{k_E}{\sqrt{d}} \right), \quad (6)$$

где σ_{y0} и σ_y – начальный (при отсутствии повреждений) и текущий пределы текучести поврежденного материала.

Модель (1)–(6) демонстрирует, что механические характеристики деградируют как от наличия дефектов, так и от неоднородности структуры зерен. Однако реальное поведение стали может быть более сложным, поскольку дефекты и границы зерен взаимодействуют на микроуровне. Дефекты зарождаются преимущественно на границах зерен, поэтому в материалах с неоднородной и нарушенной структурой зерен накопление повреждений может происходить быстрее.

Из расчетных данных следует, что интенсивность накопления повреждений в поврежденных образцах оказывается в среднем в 1,4 раза выше, чем в стандартных условиях. Это объясняется двумя взаимосвязанными факторами: снижением эффективного предела выносливости M_0 вследствие охрупчивания и одновременным повышением местных напряжений у микроповреждений, выявленных при анализе оптической и сканирующей туннельной микроскопией. Концентраторы напряжений у включений и вдоль границ зерен фактически увеличивают локальный размах напряжений $\Delta\sigma$ по сравнению с номинальным,

что дополнительно ускоряет накопление повреждений [13].

Таким образом, количественная оценка подтверждает, что структурная неоднородность, зафиксированная экспериментально, прямо транслируется в ускоренное накопление повреждений: расчетный ресурс до инициирования трещины в северных образцах оказывается на 30–35 % ниже, чем в стандартных.

Применение нормативных показателей без учета специфики эксплуатации в экстремальных климатических условиях приводит к завышению прогнозного ресурса и создает предпосылки для преждевременного выхода рельсов из строя.

Заключение

Выявлены особенности вязкого и хрупкого разрушения, включая необходимость учета закономерностей роста пор и трещин, неоднородного накопления повреждений и ускоренной деградации механических свойств. Длительная эксплуатация рельсовой стали в условиях низких температур Севера ведет к нарастанию структурной неоднородности, ускорению накопления повреждений и сокращению фактического ресурса рельсов по сравнению с нормативными показателями. Расчетный ресурс рельсов, эксплуатируемых в условиях Центральной Якутии, составил 730–780 млн т брутто против нормативных 1100 млн т брутто (расхождение порядка 30–33 %). Интенсивность накопления повреждений оказалась в 1,4 раза выше, чем в стандартных условиях эксплуатации.

Изучение механизмов структурной деградации рельсовой стали в условиях Севера показало, что происходят снижение пластичности и вязкости разрушения, усиление действия циклических нагрузок, фрагментация структуры зерен, ферритных и перлитных доменов, рост дислокационных скоплений. Для выявления неоднородности металла наиболее информативным оказалось сочетание оптической и электронной сканирующей туннельной микроскопии.

Анализ теоретических моделей накопления повреждений показал, что нелинейная модель Леметра–Шабоса позволяет учитывать зависимость скорости деградации от текущего состояния структуры. Это делает ее предпочтительной для оценки ресурса по сравнению с линейным правилом суммирования повреждений применительно к экстремальным условиям эксплуатации. Также установлена обратная степенная зависи-

мость критического напряжения разрушения от параметра поврежденности, что позволяет выявлять нелинейный характер трещиностойкости по деградации механических свойств и размеру зерен. Предел перколяции выступает как критический порог, при котором система дефектов переходит из состояния разрозненных локальных повреждений в состояние связанной объемной сети.

Проверка расчетной модели и сопоставление с нормативными показателями позволили сформулировать конкретные рекомендации: введение понижающего коэффициента ресурса 0,68–0,72, установление порогового значения наработки для внепланового структурного контроля на уровне 500 млн т брутто, а также включение данных структурного анализа в перечень критериев оценки состояния рельсов, эксплуатируемых в экстремальных климатических условиях.

Полученные результаты могут быть использованы при оценке ресурса и проектировании стальных конструкций, подверженных длительному или циклическому нагружению, где прогнозирование момента критического состояния становится задачей инженерной безопасности.

Перспективным направлением дальнейших исследований является экспериментальная верификация интегральной модели на образцах из различных материалов с отличающейся микроструктурой при различных уровнях поврежденности.

Результаты работы могут быть использованы инженерами и специалистами путевого хозяйства железных дорог Севера, подразделений ОАО «РЖД», «Железные дороги Якутии» и научных организаций, занимающихся вопросами эксплуатации железнодорожного пути в условиях экстремального климата, при разработке и корректировке нормативов по оценке ресурса рельсов, эксплуатируемых в условиях низких температур, а также при планировании сроков технического обслуживания и замены рельсового полотна, а также в учебном процессе при подготовке студентов по специальностям, связанным с материаловедением, надежностью технических систем и эксплуатацией железнодорожного транспорта.

Список литературы / References

1. Ботвина Л.Р. *Основы фрактодиагностики*. М.: Рекламно-издательский центр «Техносфера»; 2022. 394 с. EDN: MHSHDO
Botvina L.R. *Foundations of Fractodiagnosics*. Moscow: Technosfera Publ.; 2022. 394 p. (In Russ.) EDN: MHSHDO

2. Irwin G. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of Applied Mechanics*. 1957;24(3):361–364. <https://doi.org/10.1115/1.4011547>
3. Lapin R.L., Kuzkin V.A., Krivtsov A.M. Quasi-static crack growth in three-layer media: a numerical experiment. *Letters on Materials*. 2023;3(51):272–277. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2023-3-272-277> EDN: BCOWYH
4. Lepov V.V., Grigoriev A.S., 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;1–6. <https://doi.org/10.1155/2016/7178028>. EDN: WOKVVV
5. Zhang Y., Luo Y., Wu X., Guan Y. The Review of research on fatigue crack propagation in metallic materials. *International Journal of Materials Science and Technology Studies*. 2024;1(1):52–63. <https://doi.org/10.62051/ijmsts.v1n1.05>
6. Oura K., Katayama M., Zotov A.V., et al. *Surface science: An introduction*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2003. 440 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05179-5>
7. Лепов В.В., Бисонг С.М., Голых Р.Н. Многоуровневый подход к моделированию процессов разрушения материалов с субмикроструктурой, применимых в условиях Арктики и Субарктики. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):156–171. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171> EDN: FFCJUP
- Lepov V.V., Bisong S.M., Golykh R.N. Foundation of multilevel approach to fracture modeling for materials with submicrostructure applicable for Arctic and Subarctic environment. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):156–171. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-156-171> EDN: FFCJUP
8. Liu L., Ma Y., Wang S., Liu S. The fatigue behaviors of a medium-carbon pearlitic wheel-steel with elongated sulfides in high-cycle and very-high-cycle regimes. *Materials*. 2021;14(15):4318. <https://doi.org/10.3390/ma14154318> EDN: PHZKRD
9. Панин В.Е., Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А. и др. Эволюция тонкой структуры и свойств металла рельсов при длительной эксплуатации. *Физическая мезомеханика*. 2020;5(23):85–94. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-15007> EDN: QLYRNM
- Panin V.E., Ivanov Yu.F., Yuryev A.A., et al. Evolution of the fine structure and properties of rail metal in long-term operation. *Physical Mesomechanics*. 2020;5(23):85–94. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2020-15007> EDN: QLYRNM
10. Щепотин Г.К. Влияние грузонапряженности и осевых нагрузок на долговечность рельсов в регионах с холодным климатом. *Вестник Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики*. 2021; (1):5–11. https://doi.org/10.52170/1815-9262_2021_56_12 EDN: EQRYRI
- Shchepotin G.K. Influence of load-carrying capacity and axial loads on the durability of rails in regions with cold climates. *Bulletin of Siberian State University of Transport*. 2021;1:5–11. (In Russ.) https://doi.org/10.52170/1815-9262_2021_56_12 EDN: EQRYRI
11. Штайгер М.Г., Иванчик Н.Н., Лисицын А.И., Карлина А.И. Использование методов сканирующей электронной микроскопии для металлографии рельсовых сталей. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2017;56(4):189–196. [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2017.4\(56\).189-196](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2017.4(56).189-196) EDN: YLXFKE
- Steiger M.G., Ivanchik N.N., Lisitsyn A.I., Karlina A.I. Using methods of scanning electron microscopy for metallography rail steels. *Modern Technologies. System analysis. Modeling*. 2017;56(4):189–196. (In Russ.) [https://doi.org/10.26731/1813-9108.2017.4\(56\).189-196](https://doi.org/10.26731/1813-9108.2017.4(56).189-196) EDN: YLXFKE
12. Ачикасова В.С., Лепова К.Я. Исследование механизмов разрушения рельсовой стали методом морфологического СТМ-анализа изломов. В кн.: *EURASTRENCOLD-2025: Сборник трудов XII Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 55-летию ИФТПС СО РАН и 120-летию Н.В. Черского, г. Якутск, 10–14 ноября 2025 года*. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании; 2025. С.136–139. <https://doi.org/10.24412/cl-37460-2025-1-136-139> EDN: ZGBWCZ
- Achikasova V.S., Lepova K.Ya. Investigation of failure mechanisms of rail steel by morphological STM-fracturation analysis method. In: *EURASTRENCOLD-2025: Proceedings of the 12th Eurasian Symposium on Strength and Resource Problems under Low-Temperature Climatic Conditions, dedicated to the 55th Anniversary of the IPTPN SB RAS and the 120th Anniversary of N.V. Chersky, Yakutsk, November 10–14, 2025*. Kirov: Interregional Center for Innovative Technologies in Education Publ.; 2025, pp. 136–139. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/cl-37460-2025-1-136-139> EDN: ZGBWCZ
13. Дьячковский И.И., Лепов В.В., Ачикасова В.С., Григорьев А.В. Микромеханизмы накопления повреждений и разрушения рельсовой стали при эксплуатации в экстремальных условиях Севера. В кн.: *EURASTRENCOLD-2025: Сборник трудов XII Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 55-летию ИФТПС СО РАН и 120-летию Н.В. Черского, г. Якутск, 10–14 ноября 2025 года*. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании; 2025. С. 144–148. <https://doi.org/10.24412/CL-37460-2025-1-144-148> EDN: CATONU
- Dyachkovskii I., Lepov V., Achikasova V., Grigorev A. Study of fracture micro-mechanisms for rail steel under the extreme conditions of the North. In: *EURASTRENCOLD-2025: Proceedings of the 12th Eurasian Symposium on Strength and Resource Problems under Low-Temperature Climatic Conditions, dedicated to the 55th Anniversary of the IPTPN SB RAS and the 120th Anniversary of N.V. Chersky, Yakutsk, November 10-14, 2025*. Kirov: Interregional Center for Innovative Technologies in Education Publ.; 2025, pp. 144-148. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/CL-37460-2025-1-144-148> EDN: CATONU
14. Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Перегудов О.А., Громов В.Е. Эксплуатация рельсовой стали: деградация структуры и свойств поверхностного слоя. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2016;59(8):576–580. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-8-576-580> EDN: WJB NAT
- Ivanov Yu.F., Morozov K.V., Peregudov O.A., Gromov V.E. Degradation of rail steel structure and properties of the surface layer. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016;59(8):576–580. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-8-576-580> EDN: WJB NAT
15. ГОСТ 9454-2025. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. Межгосударственный стандарт. Дата введения 2026.05.01.

GOST 9454-2025 Metals. Impact bending test method at low, room, and elevated temperatures. Interstates Standard. Date of introduction 2026.05.01.

16. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях: Анализ, предсказание, предотвращение. Пер. с англ. А.М. Васильева. М.: Мир; 1984. 624 с.

Collins J.A. *Materials failure in structures: Analysis, prediction, prevention. Translated from English.* Moscow: Mir Publ.; 1984. 624 p. (In Russ.)

17. Кузнецов Р.В., Иванов Ю.Ф., Шлярова Ю.А. и др. Изменение структурно-фазовых состояний рельсов на разных этапах длительной эксплуатации. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2021; 37(3):20–26. EDN: LZVTUO

Kuznetsov R., Ivanov Yu., Shlyarova Yu et al. Change of structural-phase states of rails at different stages of long-term operation. *Bulletin of the SibSIU.* 2021;37(3):20–26. (In Russ.) EDN: LZVTUO

18. Громов В., Кормышев В., Кормышев В. и др. Формирование при закалке тонкой структуры рельсов и ее эволюция при длительной эксплуатации. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* 2020; 31(1):14–20. EDN: XWUEUX

Gromov V., Kormyshev V., Kormyshev V., et al. Genesis of thin structure of rails at hardening and its evolution at long operation. *Bulletin of the SibSIU.* 2020;(1):14–20. (In Russ.) EDN: XWUEUX

Об авторах

ДЯЧКОВСКИЙ Иван Иванович, ведущий инженер отдела 50 Цифрового конструкторского бюро Энергетики, механики и машиностроения, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», SPIN: 2489-5570, e-mail: e5dii@mail.ru

ЛЕПОВ Валерий Валерьевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник Отдела 30 Моделирования разрушения и безопасности сложных систем, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, SPIN: 1397-6725, e-mail: leprov@iptpn.ysn.ru

АЧИКАСОВА Валентина Семеновна, научный сотрудник Отдела 30 Моделирования разрушения и безопасности сложных систем, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», <https://orcid.org/0000-0002-7392-6571>, SPIN: 5185-9141, e-mail: ach_vs@mail.ru

ГРИГОРЬЕВ Альберт Викторович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Отдела 30 Моделирования разрушения и безопасности сложных систем, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – обособленное подразделение «ФИЦ «ЯНЦ СО РАН», <https://orcid.org/0000-0001-9243-1454>, SPIN: 8686-6306, e-mail: Gregor1212@mail.ru

Вклад авторов

Дьячковский И.И. — верификация данных, проведение исследования, программное обеспечение, создание черновика рукописи; **Лепов В.В.** — разработка концепции, методология, программное обеспечение, проведение исследования, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием, администрирование проекта; **Ачикасова В.С.** — методология, проведение исследования; **Григорьев А.В.** — методология

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор технических наук, главный научный сотрудник В.В. Лепов является членом редакционной коллегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Статья прошла независимое рецензирование, к рецензированию не привлекались члены редакционного совета. Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

DYACHKOVSKY, Ivan Ivanovich, Leading Engineer, Department No. 50 Digital Design Bureau of Power Engineering, Mechanics, Mechanical Engineering and Control Processes, Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS – Division of FRC YaSC SB RAS, SPIN: 2489-5570, e-mail: e5dii@mail.ru

LEPOV, Valeriy Valerievich, Dr. Sc. (Eng.), Chief Researcher, Department No. 30 Modeling of Fracture and Complex Systems Safety, Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS – Division of FRC YaSC SB RAS, <https://orcid.org/0000-0003-2360-7983>, SPIN: 1397-6725, e-mail: leprov@iptpn.ysn.ru

ACHIKASOVA, Valentina Semenovna, Researcher, Department No. 30 Modeling of Fracture and Complex Systems Safety, Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS – Division of FRC YaSC SB RAS, <https://orcid.org/0000-0002-7392-6571>, SPIN: 5185-9141, e-mail: ach_vs@mail.ru

GRIGORIEV, Albert Viktorovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Department No. 30 Modeling of Fracture and Complex Systems Safety, Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS – Division of FRC YaSC SB RAS, <https://orcid.org/0000-0001-9243-1454>, SPIN: 8686-6306, e-mail: Gregor1212@mail.ru

Authors' contribution

Dyachkovsky I.I. – validation, investigation, software, writing – original draft; **Lepov V.V.** – conceptualization, methodology, software, investigation, writing – review & editing, visualization, supervision, project administration; **Achikasova V.S.** – methodology, investigation; **Grigoryev A.V.** – methodology

Conflict of interest

One of the authors – Valery V. Lepov, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher is a member of Editorial Board of the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The article was independently peer-reviewed without the involvement of Editorial Board members. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 05.03.2026

Поступила после рецензирования / Revised 23.04.2026

Принята к публикации / Accepted 14.05.2026