

## ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 625.143.54

EDN: <https://elibrary.ru/achyfi>DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-135-151>

Научная специальность: 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог



## Особенности усталостного разрушения упругих клемм промежуточных рельсовых скреплений

Л. Р. Ботвина<sup>1</sup>, Ю. А. Демина<sup>1</sup>, В. О. Березин<sup>2</sup>✉, М. Р. Тютин<sup>1</sup>, А. В. Замуховский<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация<sup>2</sup>Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Москва, Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проблема повышения качества и продления эксплуатационного ресурса рельсовых скреплений, в частности, упругих клемм, стала наиболее острой в настоящее время. Причиной является развитие высокоскоростного и грузонапряженного движения поездов. В эксплуатации упругая клемма воспринимает преднагрузку монтажным усилием и динамическое нагружение циклами догружения и частичной разгрузки, обусловленное воздействием подвижного состава. Усталостная долговечность является наиболее важным параметром, определяющим надежность клеммы и безопасность движения поездов. Цель настоящего исследования — анализ основных механизмов усталостного разрушения трех клемм, испытанных при различных режимах циклического нагружения (по стандартной и ускоренной методикам испытаний) путем исследования изломов.

**Материалы и методы.** В качестве объекта исследования была выбрана упругая клемма ЦП 369.102 (клемма ЖБР-65). Испытания были выполнены и стандартным методом, удовлетворяющим требованиям ГОСТ 33186–2014, и ускоренным методом Локати. При анализе изломов клеммы применялся фрактографический метод.

**Результаты.** Установлено подобие процессов, приводящих к усталостному разрушению для клемм, подвергнутых испытаниям по стандартному и ускоренному методам. Проведен фрактографический анализ изломов трех упругих клемм. Для каждой из клемм представлен анализ механизма усталостного разрушения. У одной клеммы, испытанной по стандартному методу, в очаге зарождения трещины было найдено неметаллическое включение.

**Обсуждение и заключение.** Во всех рассмотренных случаях разрушение сопровождалось зарождением усталостных микротрещин от неметаллических включений или дефектов на поверхности прутка клеммы. Действующий на данный момент стандарт не нормирует загрязненность неметаллическими включениями сталей, предназначенных для изготовления клемм. Целесообразно провести дополнительные исследования для оценки влияния неметаллических включений на усталостную долговечность клемм.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** промежуточное рельсовое скрепление, клемма, фрактография, сложное напряженно-деформированное состояние, среднее напряжение цикла, излом, усталостная долговечность

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Ботвина Л. Р., Демина Ю. А., Березин В. О., Тютин М. Р., Замуховский А. В. Особенности усталостного разрушения упругих клемм промежуточных рельсовых скреплений // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2026. Т. 85, № 2. С. 135–151. EDN: <https://elibrary.ru/achyfi>.

Original article  
UDK 625.143.54  
EDN: <https://elibrary.ru/achyfi>  
DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-135-151>  
Scientific specialty: 2.9.2. Railway track, survey and design of railways



## Investigation of fatigue fracture features in elastic clamps of railway fastening systems

Ludmila R. Botvina<sup>1</sup>, Yulia A. Demina<sup>1</sup>, Vadim O. Berezin<sup>2</sup>✉,  
Marat R. Tyutin<sup>1</sup>, Alexander V. Zamukhovskiy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Russian University of Transport,  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** In this article, a study was conducted focusing on the investigation of fatigue fracture characteristics of elastic clamps used in railway fastening systems, which were subjected to fatigue tests following standard and accelerated methodologies. The problem of improving the quality and extending the service life of rail fasteners, particularly elastic clamps, has become the most acute at the present time. The reason is the development of high-speed and heavy train traffic. In operation, the elastic clamp perceives preloading by mounting force and dynamic loading by cycles of preloading and partial unloading due to the impact of rolling stock. Fatigue life is the most important parameter determining clamps reliability and train safety. The purpose of this study is to analyse the main mechanisms of fatigue fracture of three clamps tested under various cyclic loading modes (according to standard and accelerated test methods) by examining fatigue fracture surfaces.

**Materials and methods.** The elastic clamp CP 369.102 (clamp ZhBR-65) was chosen as the object of the study. The tests were performed using both the standard method that meets the requirements of GOST 33186–2014 and the accelerated Locati method. Fractographic method was used in the analysis of clamps fatigue fracture surfaces.

**Results.** The similarity of processes leading to fatigue fracture has been established for clamps tested using standard and accelerated methods. A fractographic analysis was conducted on the fatigue fracture surfaces of three elastic clamps. An analysis of the fatigue fracture mechanism is provided for each clamp. For the clamp tested by the standard method, a non-metallic inclusion was found at the crack initiation site.

**Discussion and conclusion.** In all studied cases, the fracture of the clamps was accompanied by the initiation of fatigue microcracks originating from inclusions or defects on the lateral surface (the rod surface of the clamp). Current standard does not normalise contamination with non-metallic inclusions intended for the manufacture of clamps. It is reasonable to conduct additional studies in order to assess the influence of non-metallic inclusions in the steel on the fatigue durability of the clamps.

**KEYWORDS:** intermediate rail fastening, clamp, fractography, complex stress-strain condition, mean stress, fracture, fatigue durability

**FOR CITATION:** Botvina L.R., Demina Yu.A., Berezin V.O., Tyutin M.R., Zamukhovskiy A.V. Investigation of fatigue fracture features in elastic clamps of railway fastening systems. *Russian Railway Science Journal*. 2026;85(2):135–151. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2026-85-2-135-151>.

✉ [berezin.vadim@bk.ru](mailto:berezin.vadim@bk.ru) (V. O. Berezin)

**Введение.** Среди наиболее важных параметров, определяющих надежность клеммы рельсового скрепления и влияющих на безопасность движения поездов, следует выделить усталостную долговечность. Компании — лидеры в сфере проектирования упругих клемм приводят в своих информационных изданиях<sup>1</sup> для каждой клеммы величину размаха перемещений рельса, при которой обеспечивается требуемая усталостная долговечность изделия в процессе усталостных испытаний или эксплуатации. Этот параметр в данном случае является аналогом «привычного» предела выносливости.

Для определения среднего значения предела выносливости материалов или конструкций в статистической постановке широко применяется метод лестницы, при котором образцы испытывают при напряжениях, близких к предполагаемому пределу выносливости, по следующему правилу: если образец не разрушился до базового числа циклов, напряжения для следующего образца увеличивают на фиксированный шаг, если разрушился — напряжения снижают на фиксированный шаг [1–3]. Для сокращения времени усталостных испытаний при определении среднего значения предела выносливости изделий применяют методы ускоренных испытаний [4–6]. Наиболее эффективным из данных методов по результатам анализа ряда исследований<sup>2, 3, 4</sup> признан метод Локати [4]. В основу метода положена гипотеза линейного накопления повреждений Пальмгрена — Майнера, при которой усталостное повреждение материала пропорционально наработанному числу циклов. Согласно этой гипотезе, при нестационарном нагружении усталостное разрушение испытываемого образца должно происходить при сумме относительных долговечностей  $(\sum \frac{n_i}{N_i})$ , равной единице. Здесь  $n_i$  — число циклов, накопленное изделием при  $i$ -м уровне нагрузки;  $N_i$  — долговечность (ресурс) изделия при том же уровне нагрузки. Нагрузка на изделие увеличивается ступенями до разрушения, и на каждом уровне нагрузки изделие нарабатывает  $n_i$  циклов.

После проведения испытаний, при которых разрушение образца происходит на одной из ступеней, переходят к обработке результатов путем введения условных кривых  $A$ ,  $B$ ,  $V$  в полулогарифмических коор-

динах (реальная усталостная кривая изделия лежит внутри диапазона этих кривых) и для каждой кривой подсчитывают относительные долговечности, исходя из трассы испытаний (рис. 1). Зная значения  $n_0, n_1, n_2, \dots, n_i$  и определив по каждой из условных кривых усталости соответствующие значения  $N_0, N_1, N_2, \dots, N_i$  для каждой кривой усталости, можно вычислить числовые значения  $\sum \frac{n_i}{N_i}$ . Таким образом, получают три числовых значения суммы относительных долговечностей, соответствующих трем условным кривым усталости с пределами выносливости  $\sigma_{R^a}, \sigma_{R^b}, \sigma_{R^c}$ . Затем по графику в координатах  $(\sum \frac{n_i}{N_i}; \sigma_R)$  (рис. 2) методом графической интерполяции по кривой  $I$  определяется значение предела выносливости  $\sigma_{R^y}$ , соответствующее величине  $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$ . Это значение считается оценкой предела выносливости методом Локати<sup>5</sup>.

Авторами настоящей работы в целях проверки применимости метода Локати для проведения ускоренных усталостных испытаний упругих клемм были определены средние значения предела выносливости упругой клеммы ЦП 369.102 (клеммы ЖБР-65), рис. 3, двумя методами: лестницы и Локати [7].

Следует отметить, что одиночное испытание на усталость клеммы при определении среднего значения предела выносливости по методу лестницы идентично стандартному испытанию на усталость по ГОСТ 33186–2014<sup>6</sup>. Метод лестницы предъявляет требования только к необходимому количеству испытаний и правилу изменения уровней нагружения в зависимости от результатов предыдущего испытания клеммы на усталость.

Было показано, что среднее значение предела выносливости клеммы ЦП 369.102 (клеммы ЖБР-65), полученное двумя методами, практически совпадает (разница составила 5%), что позволяет рекомендовать метод Локати для усталостных испытаний клемм как альтернативный. Кроме того, существует ряд современных исследований, подтверждающих его эффективность в разных областях науки и техники (железнодорожный транспорт, авиационная техника, медицина и т.д.) [8–11]. В процессе проведения усталостных

<sup>1</sup> High-elasticity rail fastening System 300. Vossloh. URL: [https://media.vossloh.com/media/01\\_product\\_finder/vfs/pf\\_system\\_300/Vossloh\\_System\\_300\\_EN.pdf](https://media.vossloh.com/media/01_product_finder/vfs/pf_system_300/Vossloh_System_300_EN.pdf) (дата обращения: 13.04.2026).

<sup>2</sup> Шварев В. В. Исследование ускоренных методов определения предела выносливости стали в условиях концентрации напряжений: дисс. канд. техн. наук: 05.00.00. М., 1964. 152 с.

<sup>3</sup> Соболев В. Л. Исследование, разработка и стандартизация методов ускоренной оценки сопротивления усталости материалов и деталей машин: дисс. канд. техн. наук: 05.02.02. М., 1973. 267 с.

<sup>4</sup> Олейник Н. В., Скляр С. П. Ускоренные испытания на усталость. Киев: Наукова думка, 1985. 304 с.

<sup>5</sup> Соболев В. Л. Исследование, разработка и стандартизация методов ускоренной оценки сопротивления усталости материалов и деталей машин.

<sup>6</sup> ГОСТ 33186–2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 февраля 2015 г. № 93-ст. М.: Стандартинформ, 2015. 5 с.

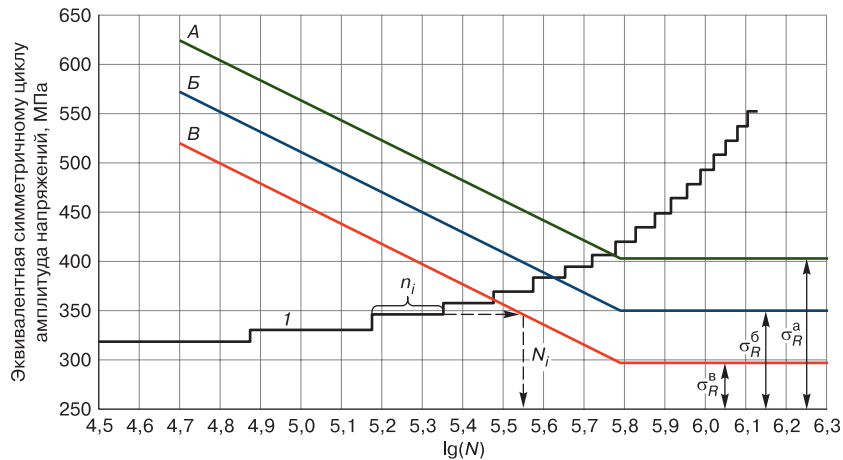


Рис. 1. Условные кривые усталости (A, B, B) и трасса нагружения (I) по методу Локати (пример)\*:

A — условная кривая усталости, соответствующая вероятности разрушения 95 %; B — условная кривая усталости, соответствующая вероятности разрушения 50 %; B — условная кривая усталости, соответствующая вероятности разрушения 5 %;  $\sigma_R^A$  — предел выносливости для условной кривой усталости A;  $\sigma_R^B$  — предел выносливости для условной кривой усталости B;  $\sigma_R^B$  — предел выносливости для условной кривой усталости B;  $\sigma_R^A$  — предел выносливости для условной кривой усталости A;  $n_i$  — число циклов, накопленное изделием при  $i$ -м уровне нагрузки;  $N_i$  — долговечность (ресурс) изделия при  $i$ -м уровне нагрузки

\* Источник: данные авторов

Fig. 1. Conditional fatigue curves and test route according to the Locati method (example)\*:

A — conditional fatigue curve corresponding to a 95 % probability of failure; B — conditional fatigue curve corresponding to a 50 % probability of failure; B — conditional fatigue curve corresponding to a 5 % probability of failure;  $\sigma_R^A$  — endurance limit for conditional fatigue curve A;  $\sigma_R^B$  — endurance limit for conditional fatigue curve B;  $\sigma_R^B$  — endurance limit for conditional fatigue curve B;  $n_i$  — number of cycles accumulated by the component at the  $i$ -th load level;  $N_i$  — service life (durability) of the component at the  $i$ -th load level

\* Source: authors' data

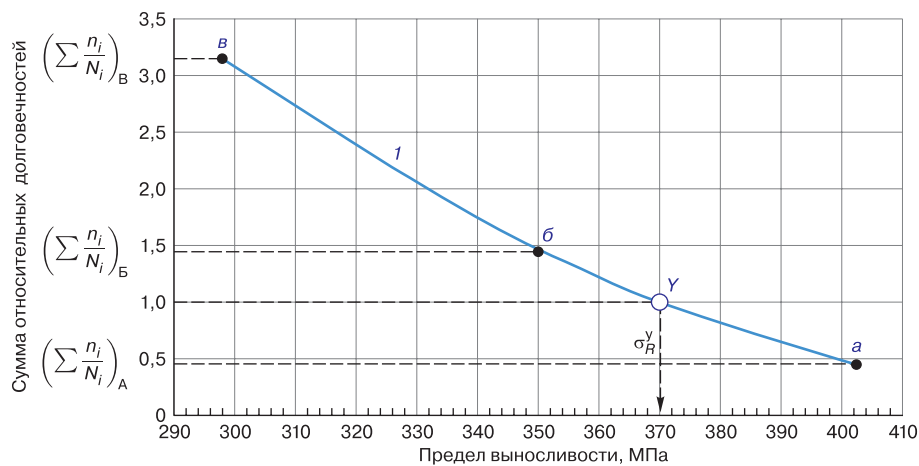


Рис. 2. График для определения предела выносливости по методу Локати (пример)\*:

$\sigma_R^y$  — предел выносливости, соответствующий величине  $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$ ;  $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_A$  — сумма относительных долговечностей для условной кривой усталости A;  $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_B$  — сумма относительных долговечностей для условной кривой усталости B;  $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_B$  — сумма относительных долговечностей для условной кривой усталости B; I — кривая по точкам (a; б; в)

\* Источник: данные авторов

Fig. 2. Graph for determining the endurance limit using the Locati method (example)\*:

$\sigma_R^y$  — endurance limit corresponding to the value  $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$ ;  $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_A$  — the sum of relative durabilities for conditional fatigue curve A;  $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_B$  — the sum of relative durabilities for conditional fatigue curve B;  $\left(\sum \frac{n_i}{N_i}\right)_B$  — the sum of relative durabilities for conditional fatigue curve B;

I — curve through points (a; б; в)

\* Source: authors' data

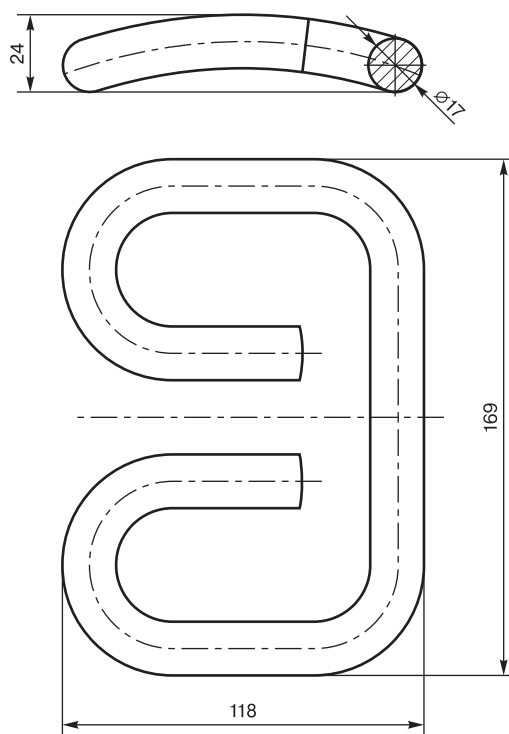


Рис. 3. Эскиз клеммы ЦП 369.102 (клеммы ЖБР-65)\*  
\* Источник: данные авторов

Fig. 3. Sketch of clamp CP 369.102 (clamp ZhBR-65)\*  
\* Source: authors' data

испытаний по методу лестницы была выявлена следующая особенность: упругая клемма могла разрушиться как при 202 тыс. циклов, так и не разрушиться до базы испытаний в 2 млн циклов на уровне нагрузки, соответствующей размаху перемещений рельса 3,1 мм. Полученные результаты привели к необходимости установления причин раннего усталостного разрушения одной из указанных выше клемм. Интерес представляло изучение особенностей усталостного разрушения клемм, испытанных по методу Локати.

Авторы работы [12] выделили следующие факторы, влияющие на усталостные характеристики клемм: обезуглерожженный слой, концентрация напряжений, качество поверхности, неметаллические включения, режимы термообработки. При проведении фрактографического анализа они обнаружили, что причиной преждевременного разрушения исследованной клеммы была твердая частица в поверхностном слое, которая была вдавлена в него в процессе гибки при производстве клеммы и служила концентратором напряжений, приведшим к преждевременному усталостному разрушению.

В работах [13–14] приведена информация о влиянии режимов термообработки на величину обезуглеро-

женного слоя и на микроструктуру материала, что подтверждает их влияние на усталостные характеристики клемм.

В работе [15] на примере клеммы E-clip (упругая клемма компании Pandrol<sup>7</sup>) показано влияние положения клеммы в узле скрепления на ее усталостную долговечность. Так, при наихудшем варианте установки клеммы (прогиб клеммы при установке составил 14 мм, величина зазора между клеммой и анкером — 1,5 мм) ее усталостная долговечность может снижаться до 1,7 % от ожидаемого срока службы.

При оценке усталостных характеристик клемм также важно учитывать влияние сложного напряженно-деформированного состояния и среднего напряжения цикла. Нагружение упругой клеммы при эксплуатации включает в себя преднапряжение монтажным усилием и сопровождается обусловленными нагрузками от подвижного состава, содержащими в себе циклы дополнительного нагружения и частичной разгрузки. Указанные нагрузки вызывают сложное напряженно-деформированное состояние. При этом монтажное прижатие обуславливает высокие средние напряжения цикла в клемме, что оказывает значительное влияние на ее усталостную долговечность [15–18].

В качестве материала клемм используют высокопрочные рессорно-пружинные стали, такие как стали 60С2, 60С2А и 65Г [19]. Для сравнения работоспособности этих сталей в качестве материала клемм в работе [19] оценены их механические свойства в условиях статического и циклического растяжения и изгиба с кручением, оценено напряженно-деформированное состояние путем численного анализа и изучен микрорельеф изломов. В результате было получено, что эксплуатационные свойства менее прочной, но более пластичной стали 60С2 были выше по сравнению со сталью 65Г. Микрорельеф усталостных изломов этой стали был вязкий, в отличие от вязко-хрупкого излома с фасетками меж- и внутризеренного скола стали 65Г. В качестве характеристики релаксационных свойств авторы работы предложили энергию деформации, оцениваемую по снижению усилия прижатия и остаточной деформации клеммы после определенного числа циклов нагружения, определили расположение области с максимальными напряжениями на клеммах и показали, что максимальные значения достигаются в поверхностных слоях клеммы.

Однако более детальное исследование усталости рессорно-пружинных сталей, близких по составу стали 60С2, было выполнено авторами работы [20], особенность которой состояла в том, что она была проведена в широком диапазоне чисел циклов, вплоть до гигациклов, были построены диаграммы усталостного

<sup>7</sup> Pandrol: Homepage. URL: <https://www.pandrol.com/> (дата обращения: 01.04.2026).

разрушения с оценкой порогового значения трещиностойкости и оценено влияние размера включений на зарождение трещины. Авторы пришли к выводу о том, что включения не влияли на снижение усталостной долговечности вплоть до гигациклового режима, трещина зарождалась не от внутренних дефектов, а от поверхностных трещин, развивающихся по границам структурных элементов в поверхностном слое.

С другой стороны, исследования пружинной стали SWOSC-V (близка по составу стали 60C2XA) [21] приводят к выводам о том, что неметаллические включения являются основными источниками зарождения усталостной трещины в условиях сверхмногоциклового усталости (больше  $10^7$  циклов), а основными характеристиками включений, влияющими на усталостную долговечность, являются их размер [22] и форма. Показано, что оксиды наиболее опасны при осевом нагружении, а сульфидные включения (MnS) — при кручении из-за их вытянутой формы.

Роль поверхностного слоя клемм в зарождении усталостной трещины в стали 60Si2Mn детально изучена авторами работы [23], которые установили значительное влияние процесса производства клеммы на ее характеристики при эксплуатации. Во время первичного нагрева стального стержня для придания клемме ее формы происходит окисление и обезуглероживание поверхностного слоя с образованием оксида железа. Обезуглероживание снижает характеристики сопротивления усталости, а последующая дробеструйная обработка способствует проникновению оксида железа на глубину 20–50 мкм и зарождению в нем трещин, являющихся очагами усталостного разрушения.

По результатам проведенного анализа можно сделать вывод о том, что усталостная долговечность клемм и характер изломов зависят от свойств материала, технологии изготовления и условий эксплуатации. Причинами зарождения трещин могут быть как дефекты поверхностного слоя, так и неметаллические включения. Их идентификация возможна при фрактографическом исследовании изломов на разных стадиях развития трещины.

С учетом вышеизложенного, цель настоящего исследования состояла в анализе основных механизмов усталостного разрушения трех клемм, испытанных при различных режимах циклического нагружения путем исследования изломов.

**Материалы и методы исследования.** В качестве метода исследования выбран фрактографический метод.

Анализ макрорельефа изломов трех разрушенных клемм из рессорно-пружинной стали 60C2A выполнен с применением оптического микроскопа ЛОМО МСП-2 и цифрового фотоаппарата Canon, а исследование микрорельефа — с использованием электронного сканирующего микроскопа Jeol JXA-iSP100, оснащенного системой рентгеновского микроанализа.

Химический состав стали по ГОСТ 14959–2016<sup>8</sup> приведен в табл. 1.

**Подготовка к проведению усталостных испытаний.** Перед испытаниями на усталость клеммы нагружали три раза в соответствии с ГОСТ 33186–2014<sup>9</sup> согласно схеме, приведенной на рис. 4.

Нагружение концевых участков клеммы осуществляли через нагружающее приспособление до достижения усилия на штоке испытательной машины, равного 25 кН. Указанное усилие, приложенное к концевым участкам клеммы (половина расстояния между точками опор на упоре и на рельсе), обеспечивает требование ГОСТ 32698–2014<sup>10</sup> к усилию монтажного прижатия рельса к шпале от двух клемм не менее 25 кН.

После контроля величины остаточной деформации клеммы допускались до усталостных испытаний.

Усталостные испытания клемм проводились согласно схеме, представленной на рис. 5 [16].

Важно отметить, что испытание на усталость по методу Локати в части подхода к нагружению упругих клемм отличалось от стандартного испытания по методу лестницы только наличием нескольких ступеней при проведении испытаний (клемма испытывалась со ступенчато возрастающей нагрузкой до разрушения). В связи с этим информацию о методике проведения усталостных испытаний, приведенную ниже, стоит оценивать с учетом указанного выше отличия.

Таблица 1

Химический состав стали 60C2A\*

Table 1

Chemical composition of steel 60C2A\*

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, % не более	Ni, % не более	Cu, % не более
0,58–0,63	1,6–2,0	0,6–0,9	0,3	0,25	0,2

\* Источник: ГОСТ 14959–2016

\* Source: GOST 14959–2016

<sup>8</sup> ГОСТ 14959–2016.Metalloprodukcija iz ressorno-pruzhinnoj nелегированной и легированной стали. Технические условия: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 марта 2017 г. № 112-ст. М.: Стандартинформ, 2017. 27 с.

<sup>9</sup> ГОСТ 33186–2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия.

<sup>10</sup> ГОСТ 32698–2014. Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 августа 2014 г. № 932-ст. М.: Стандартинформ, 2015. 9 с.

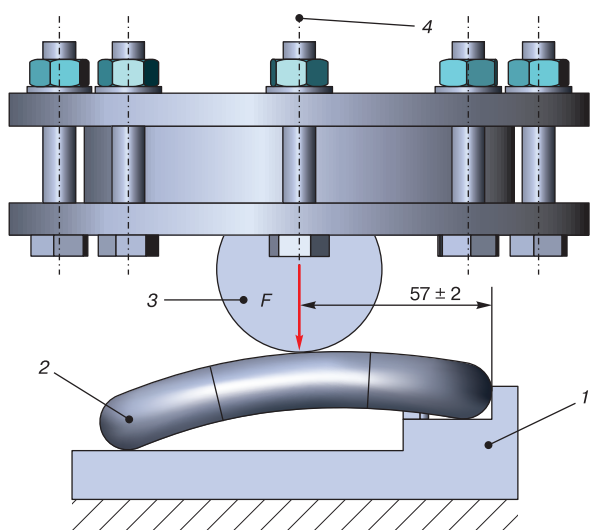


Рис. 4. Схема нагружения клеммы\*:  
1 — опорная плита; 2 — клемма; 3 — нагружающее приспособление;  
4 — ось штока испытательной машины  
\* Источник: [24]

Fig. 4. Loading scheme\*:  
1 — base plate; 2 — clamp; 3 — loading device; 4 — testing machine rod axis  
\* Source: [24]

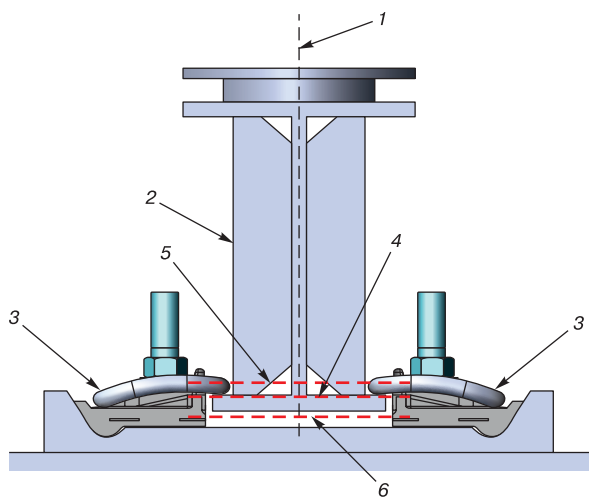


Рис. 5. Схема циклического нагружения клемм при испытаниях на усталость\*:  
1 — ось штока испытательной машины; 2 — нагружающее приспособление; 3 — клемма; 4 — положение штока № 1;  
5 — положение штока № 2; 6 — положение штока № 3  
\* Источник: [16]

Fig. 5. Scheme of cyclic loading of clamps during fatigue tests\*:  
1 — testing machine rod axis; 2 — loading device; 3 — clamp; 4 — position of rod No. 1; 5 — position of rod No. 2; 6 — position of rod No. 3  
\* Source: [16]

Перед началом испытаний шток испытательной машины поднимали вверх до достижения усилия 25 кН, по 12,5 кН на каждую из клемм (положение штока № 1 на рис. 5). В процессе циклического нагружения шток испытательной машины многократно перемещался между положениями № 2 и № 3.

Дополнительное нагружение клеммы (положение штока № 2 на рис. 5) соответствует перемещению вверх относительно положения № 1 на величину, равную 10 % от задаваемого размаха перемещений для конкретного испытания.

Частичное снятие нагрузки на клемму (положение штока № 3 на рис. 5) соответствует перемещению вниз относительно положения № 1 на величину, равную 90 % от задаваемого размаха перемещений для конкретного испытания.

В связи с тем, что ГОСТ 33186–2014<sup>11</sup> не предъявляет требований к соотношению перемещений при нагрузке и разгрузке клеммы при проведении усталостных испытаний, оно выбрано в соответствии со стандартом DBS 918 127<sup>12</sup>. Указанное соотношение перемещений позволяет обеспечить коэффициент асимметрии цикла при проведении стендовых усталостных испытаний, близкий к коэффициенту асимметрии цикла, в котором работает клемма при эксплуатации.

Трасса испытания по методу Локати (рис. 6) определяется следующими параметрами нагружения: начальное напряжение  $\sigma_0$ , Па, приращение напряжения при переходе на новый уровень  $\Delta\sigma$ , Па, количество циклов для уровня нагружений  $n_i$ , средняя скорость роста напряжений  $\alpha$ ,  $\frac{\text{Па}}{\text{цикл}}$ .

Соответствующая трасса испытаний клемм по методу Локати представлена на рис. 6 [7].

**Результаты усталостных испытаний клемм.** Клеммы испытывались попарно до разрушения одной из клемм. Всего за время проведения исследований было испытано 14 пар клемм по методу лестницы и 5 пар клемм по методу Локати [7]. В настоящей работе приводятся результаты испытаний для двух клемм, № 11 и № 13, которые были испытаны при ступенчато возрастающей нагрузке по методу Локати, и для одной клеммы № 19, которая была испытана по стандартной методике<sup>13</sup> на одном уровне нагрузки, соответствующем размаху перемещений рельса 3,1 мм. Указанные клеммы были доведены до разрушения. В работе [16] было установлено, что клеммы ЖБР-65 разрушаются при усталостных испытаниях в двух типичных местах, отмеченных на рис. 7.

<sup>11</sup> ГОСТ 33186–2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия.

<sup>12</sup> DBS 918 127. Rail fastenings made of spring steel. Rail clips, tension clips, spring clips: Federal Railway Authority, January 2021. 25 p. URL: [https://www.deutschebahn.com/resource/blob/6893394/47c33650ffc9416e71825854f59ac996/DBS918127\\_V4\\_0\\_EN\\_US-data.pdf](https://www.deutschebahn.com/resource/blob/6893394/47c33650ffc9416e71825854f59ac996/DBS918127_V4_0_EN_US-data.pdf) (дата обращения: 01.04.2026).

<sup>13</sup> ГОСТ 33186–2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия.

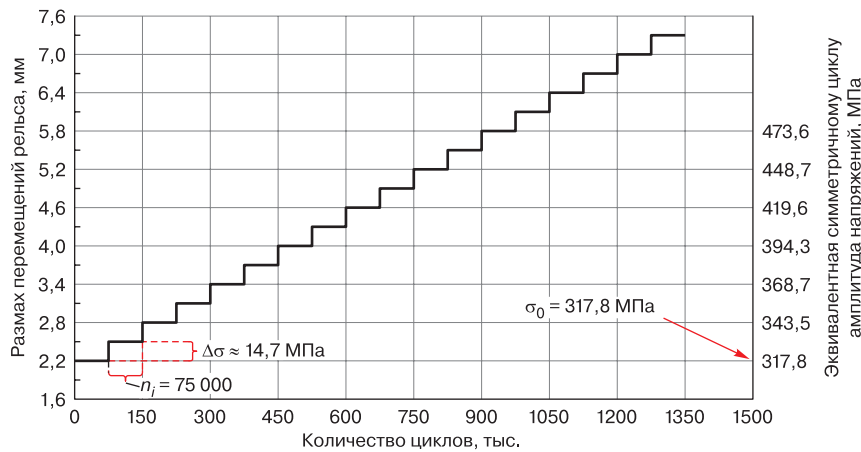


Рис. 6. Трасса испытания по методу Локати\*:

$\sigma_0$  — начальное напряжение;  $\Delta\sigma$  — приращение напряжения при переходе на новый уровень;  $n_i$  — количество циклов для уровня нагружений  
\* Источник: [7]

Fig. 6. Locati method test route\*:

$\sigma_0$  — initial stress;  $\Delta\sigma$  — stress increment when moving to the next level;  $n_i$  — number of cycles at a given loading level  
\* Source: [7]

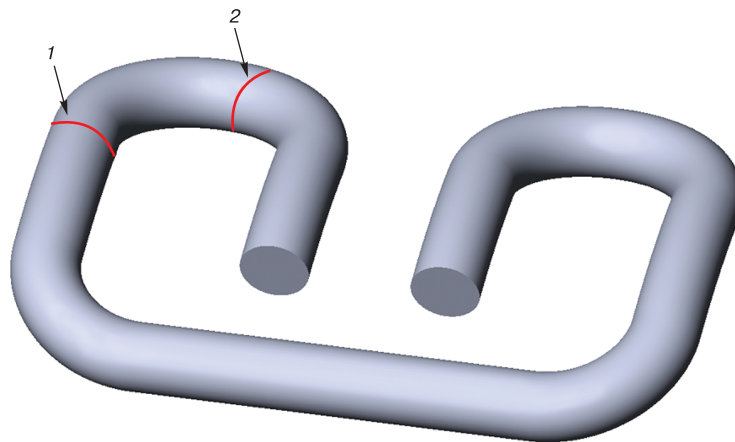


Рис. 7. Типичные места усталостных изломов клеммы ЖБР-65 согласно результатам работы [16] (вид сверху)\*:

1 — место усталостного излома № 1; 2 — место усталостного излома № 2

\* Источник: данные авторов

Fig. 7. Typical locations of fatigue fractures of the clamp ZhBR-65 according to the results of work [16] (top view)\*:

1 — fatigue fracture location No. 1; 2 — fatigue fracture location No. 2

\* Source: authors' data

Выбор клемм № 11 и 13 в качестве объекта исследования связан с необходимостью установления основных механизмов усталостного разрушения клемм, испытанных при ступенчато возрастающей нагрузке. Выбор клеммы № 19 в качестве объекта исследования связан с необходимостью установления причин ее раннего разрушения при стационарном нагружении (долговечность клеммы составила 202 тыс. циклов при размахе перемещений рельса 3,1 мм).

Режимы и результаты усталостных испытаний вышеописанных клемм сведены в табл. 2.

**Результаты анализа макро- и микрорельефа изломов.** На рис. 8–11 представлены картины макро- и микрорельефа усталостного разрушения испытанных клемм, для анализа которых были применены методы фрактографии<sup>14</sup>.

Для клеммы № 19 на рис. 8, а в нижней части излома хорошо видна зона стабильного роста усталостной трещины  $l_f$  и следующая за ней зона ее ускоренного

<sup>14</sup> Ботвина Л. Р. Основы фрактодиагностики. М.: Техносфера, 2022. 394 с.

роста  $l_f$  (показаны стрелками). При большем увеличении наблюдается очаг зарождения трещины, сформировавшийся на микротрещинах боковой поверхности прутка клеммы с включениями внутри них (показан

стрелкой на рис. 8, б). Помимо основного очага обнаруживаются и несколько более мелких очагов (показаны стрелками на рис. 8, в), также развивающихся от поверхностных дефектов.

Таблица 2

Режимы и результаты усталостных испытаний\*

Table 2

Modes and results of fatigue testing\*

№ клеммы	Начальная эквивалентная симметричному циклу амплитуда напряжений $\sigma_0$ , МПа	Приращение напряжения при переходе на новый уровень $\Delta\sigma$ , МПа	Кол-во циклов на одном уровне нагружения $n_i$	Кол-во циклов до разрушения	Кол-во ступеней до разрушения
11	317,8	14,7	75 000	548 695	8
13	317,8	14,7	75 000	809 522	11
19	351,8	—	—	202 000	—

\* Источник: данные авторов

\* Source: authors' data

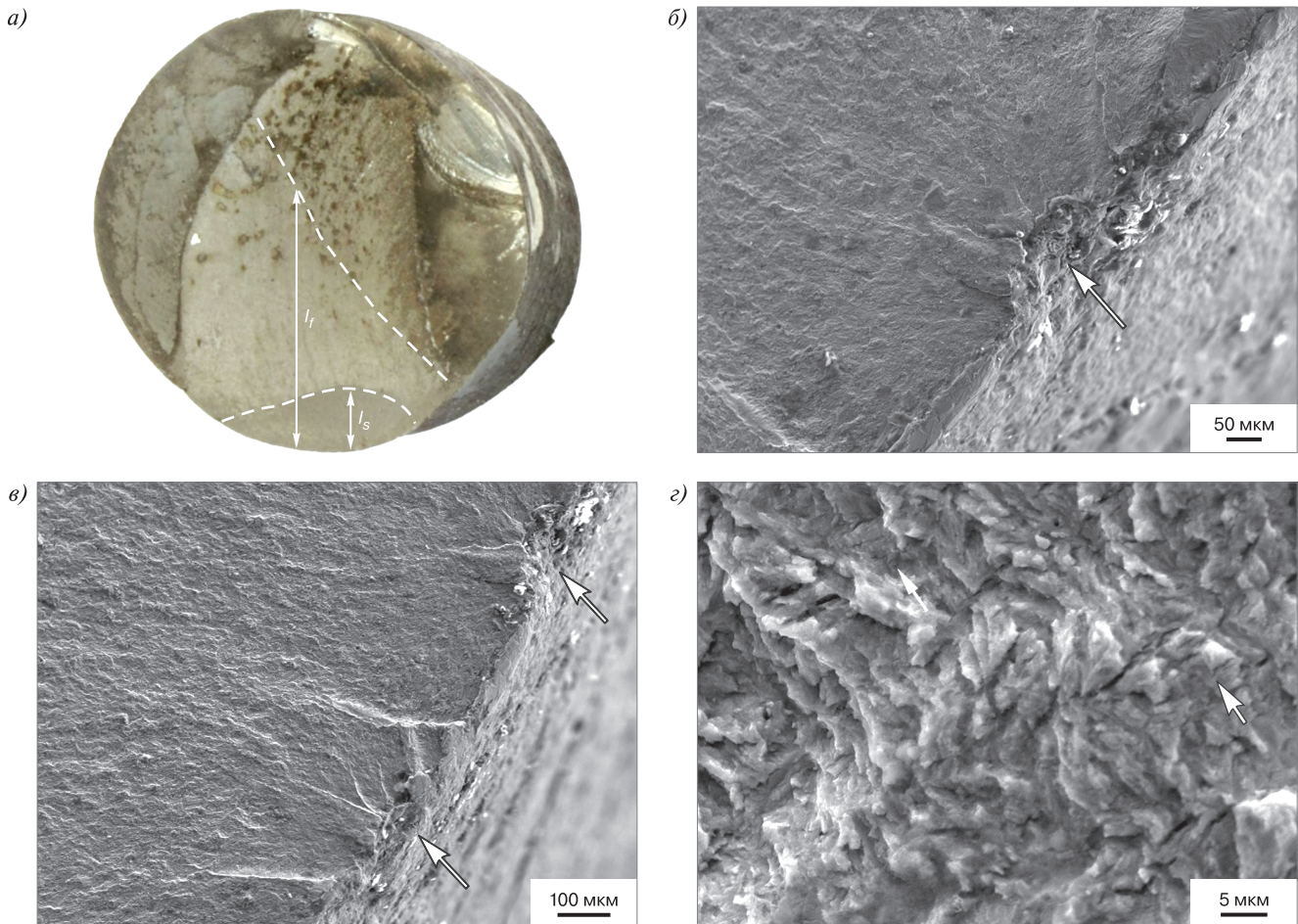


Рис. 8. Рельеф излома клеммы № 19\*:  
 а — общий вид; б, в — зона зарождения; г — зона стабильного роста  $l_s$

\* Источник: данные авторов

Fig. 8. Fracture surface relief of clamp No. 19\*:  
 а — macro view; б, в — origin zone; г — stable crack growth  $l_s$  zone

\* Source: authors' data

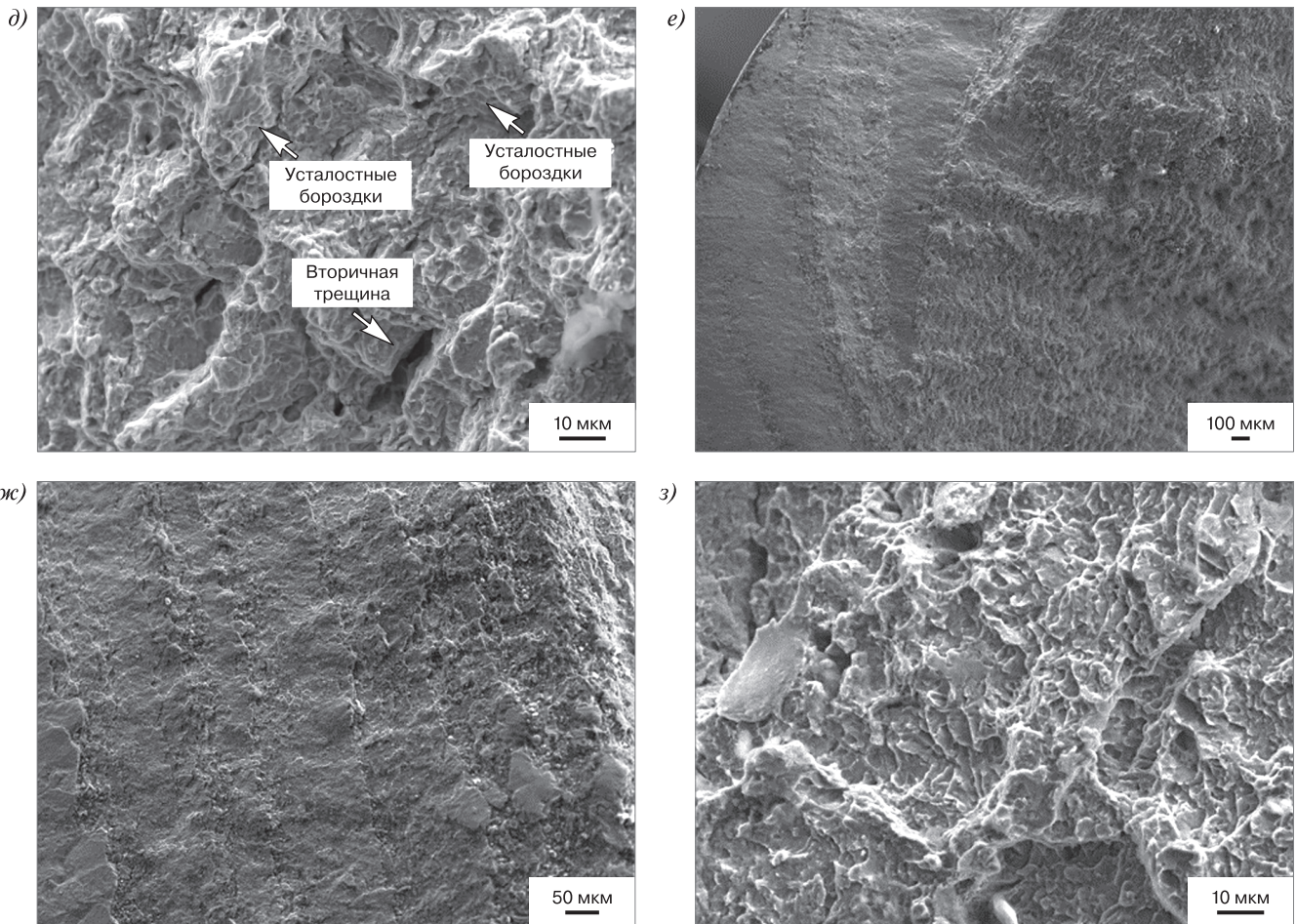


Рис. 8. (Окончание). Рельеф излома клеммы № 19\*:  
 д — зона ускоренного роста  $l_f$ ; е, ж, з — периферийные области  
 \* Источник: данные авторов

Fig. 8. (Final part). Fracture surface relief of clamp No. 19\*:  
 д — accelerated crack growth  $l_f$  zone; е, ж, з — peripheral areas  
 \* Source: authors' data

При исследовании микрорельефа в зоне стабильного усталостного развития трещины  $l_s$  видны радиальные гребни с бороздчатым микрорельефом между ними (рис. 8, *г*). Наряду с бороздками (показаны стрелками, рис. 8, *д*) появляются вторичные трещины, вязкие ямки, участки сглаженного, вероятно, сдвигового разрушения (рис. 8, *д*) и начинается ускоренный рост трещины  $l_f$ , который заканчивается преимущественно вязким ямочным доломом. В периферийных областях (рис. 8, *е–з*), сопровождающих развитие основной трещины, наблюдаются участки с полосчатым (рис. 8, *е, ж*) и квазихрупким рельефом (рис. 8, *з*).

Путем рентгеновского микроанализа на электронном микроскопе Jeol JXA-iSP100 было оценено содержание химических элементов в неметаллических включениях, наблюдаемых в области очага зарождения усталостной трещины клеммы № 19 на рис. 9.

Как следует из табл. 3, неметаллические включения, обнаруженные на поверхности излома клеммы, представлены оксидами кальция (спектры 1 и 2, рис. 9) и алюмосиликатами (спектр 3, рис. 9).

На рис. 10 приведены фрактограммы разрушенной клеммы № 13. Вид макроизлома (рис. 10, *а*) подобен виду макроизлома клеммы № 19, показанному на рис. 8, *а*, так же как и микрорельеф в области очага трещины (показан стрелками на рис. 10, *б, в*) с тем отличием, что в самом очаге не наблюдается включений. Как и на изломе клеммы № 19, обнаруживается типичный для усталостного разрушения бороздчатый микрорельеф (рис. 10, *г, д*) с вторичными микротрещинами (рис. 10, *д*) в области ускоренного роста трещины. С увеличением длины макротрещины и переходом к долому число вторичных трещин увеличивается, наблюдаются вязкие ямки

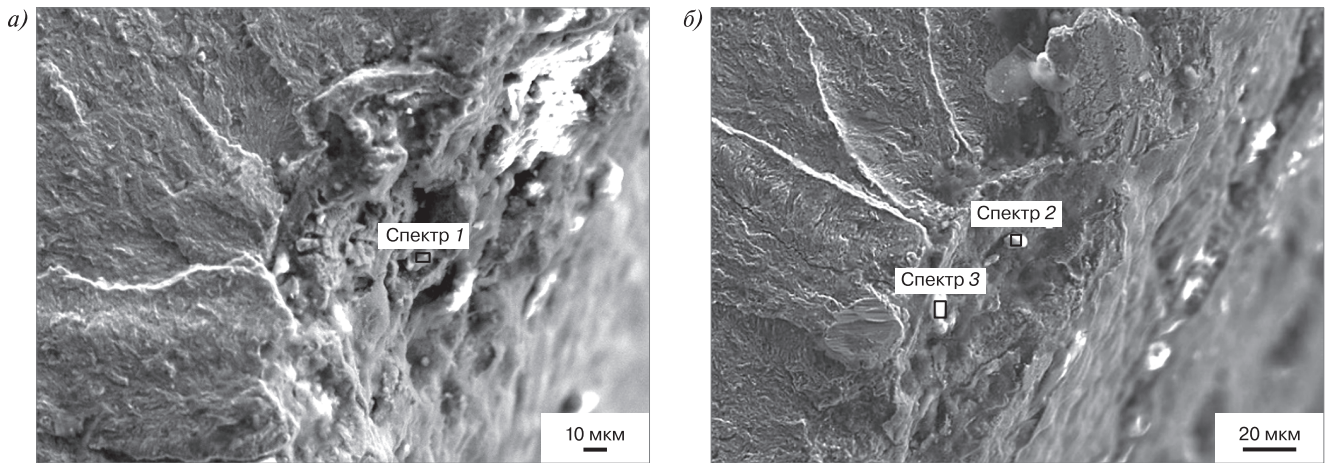


Рис. 9. Очаг зарождения усталостной трещины в клемме № 19, наблюдаемый на рис. 8, б, с указанием места расположения включения и номера спектра\*

\* Источник: данные авторов

Fig. 9. Fatigue crack origin in clamp No. 19, observed in fig. 8, б, indicating the location of the inclusion and the spectrum number\*

\* Source: authors' data

Таблица 3

Содержание элементов в неметаллических включениях на изломе клеммы № 19\*

Table 3

Content of elements in nonmetallic inclusions on the fracture surface of clamp No. 19\*

Спектр	Химический элемент, масс. %											
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
1	18,91	24,13	1,60	0,83	7,89	1,92	—	0,37	—	25,62	0,55	18,21
2	18,45	35,75	—	14,98	—	—	—	—	—	28,95	—	1,86
3	12,51	38,27	1,34	0,76	14,09	17,62	0,53	0,52	7,28	2,85	0,54	3,71

\* Источник: данные авторов

\* Source: authors' data

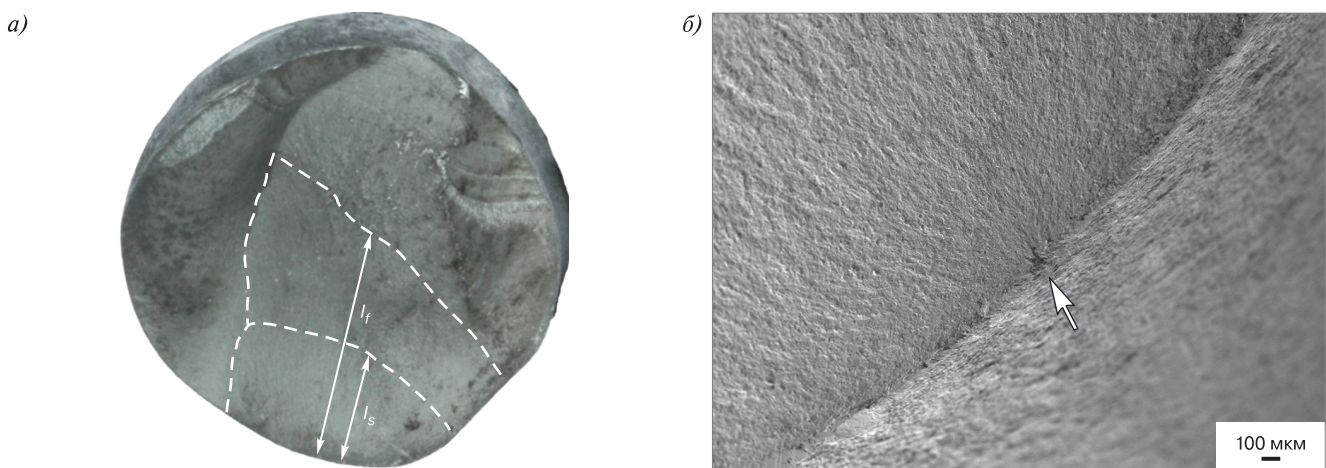


Рис. 10. Рельеф излома клеммы № 13\*:

а — общий вид; б — зона зарождения

\* Источник: данные авторов

Fig. 10. Fracture surface relief of clamp No. 13\*:

а — macro view; б — origin zone

\* Source: authors' data

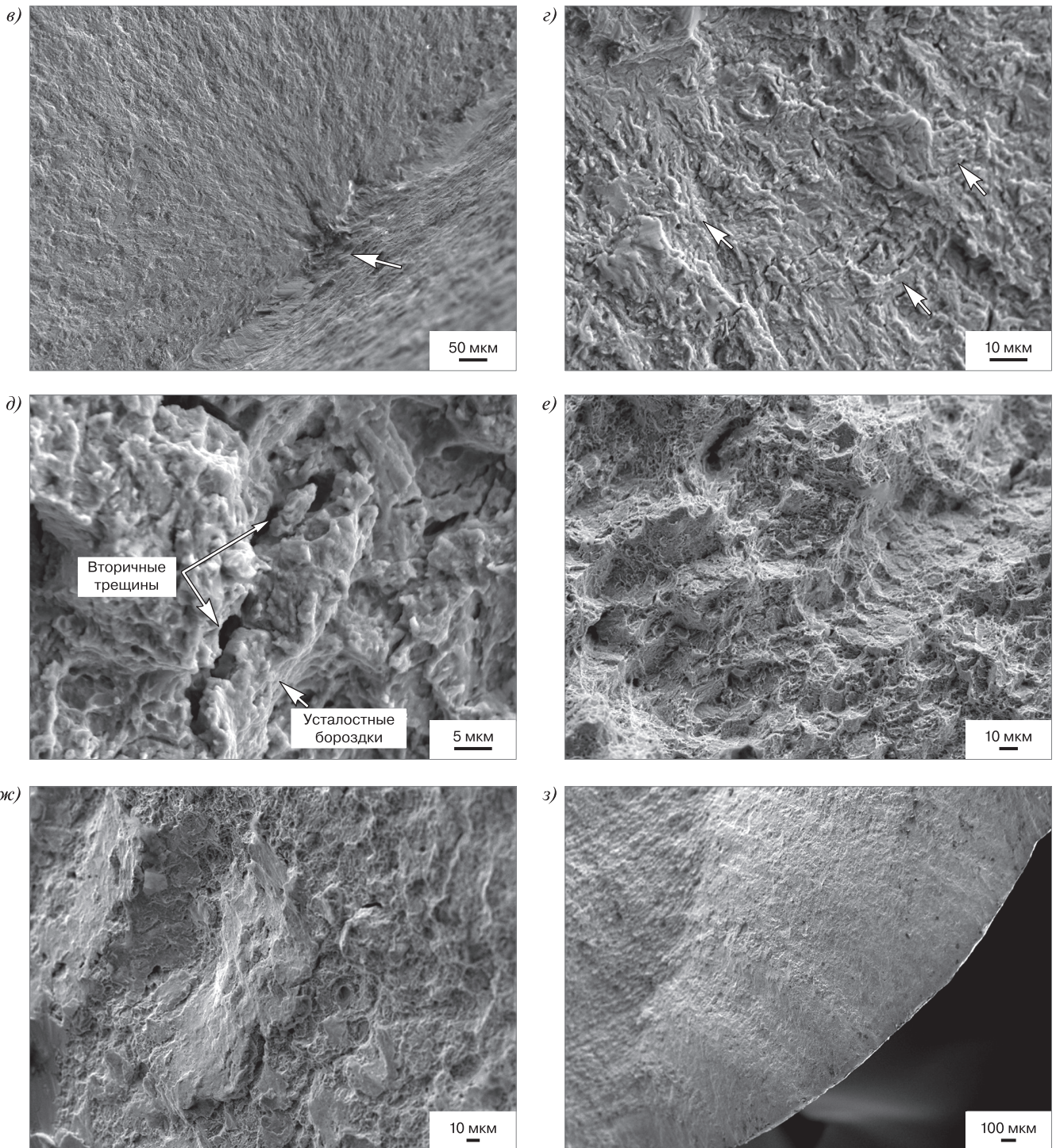


Рис. 10. (Окончание). Рельеф излома клеммы № 13\*:  
 а — зона зарождения; б — зона стабильного роста  $l_s$ ; в — зона ускоренного роста  $l_f$ ; г — зона долома;  
 д, е — периферийные области  
 \* Источник: данные авторов

Fig. 10. (Final part). Fracture surface relief of clamp No. 13\*:  
 а — origin zone; б — stable crack growth  $l_s$  zone; в — accelerated crack growth  $l_f$  zone; г — final rupture zone;  
 д, е — peripheral areas  
 \* Source: authors' data

и участки сглаженного, возможно сдвигового разрушения (рис. 10, *е*). На рис. 10, *ж, з*, представлен микрорельеф зон, сопровождающих движение основной трещины.

При изучении микрорельефа разрушения клеммы № 11 (рис. 11) обнаружены те же особенности, что и при исследовании изломов предыдущих клемм: зона очага трещины (рис. 11, *а*), зарожденная на поверхностных дефектах (не на включениях) (показана стрелками на рис. 11, *б, в*), бороздки в зоне стабильного усталостного развития трещины (рис. 11, *г, д*), вязкие ямки с вторичными трещинами и сглаженными сдвиговыми участками в области ускоренного роста трещины (рис. 11, *е*) и долома (рис. 11, *ж*) и полосами скачкообразного роста трещины в периферических областях (рис. 11, *з*).

**Обсуждение.** Проблема повышения качества и продления эксплуатационного ресурса рельсовых скреплений, в частности, упругих клемм, стала наиболее острой в настоящее время в результате развития высокоскоростного и грузонапряженного движения поездов на территории Российской Федерации [25–27]. Упругие клеммы являются одним из наиболее важных элементов рельсовых скреплений, обеспечивающих стабильность прижатия рельса к основанию.

Одной из главных проблем применения упругих клемм является их преждевременное усталостное разрушение при эксплуатации, которое обусловлено влиянием таких факторов как микроструктура, состояние поверхности, остаточные напряжения, загрязненность неметаллическими включениями, концентрация напряжений при геометрических переходах и т. д.

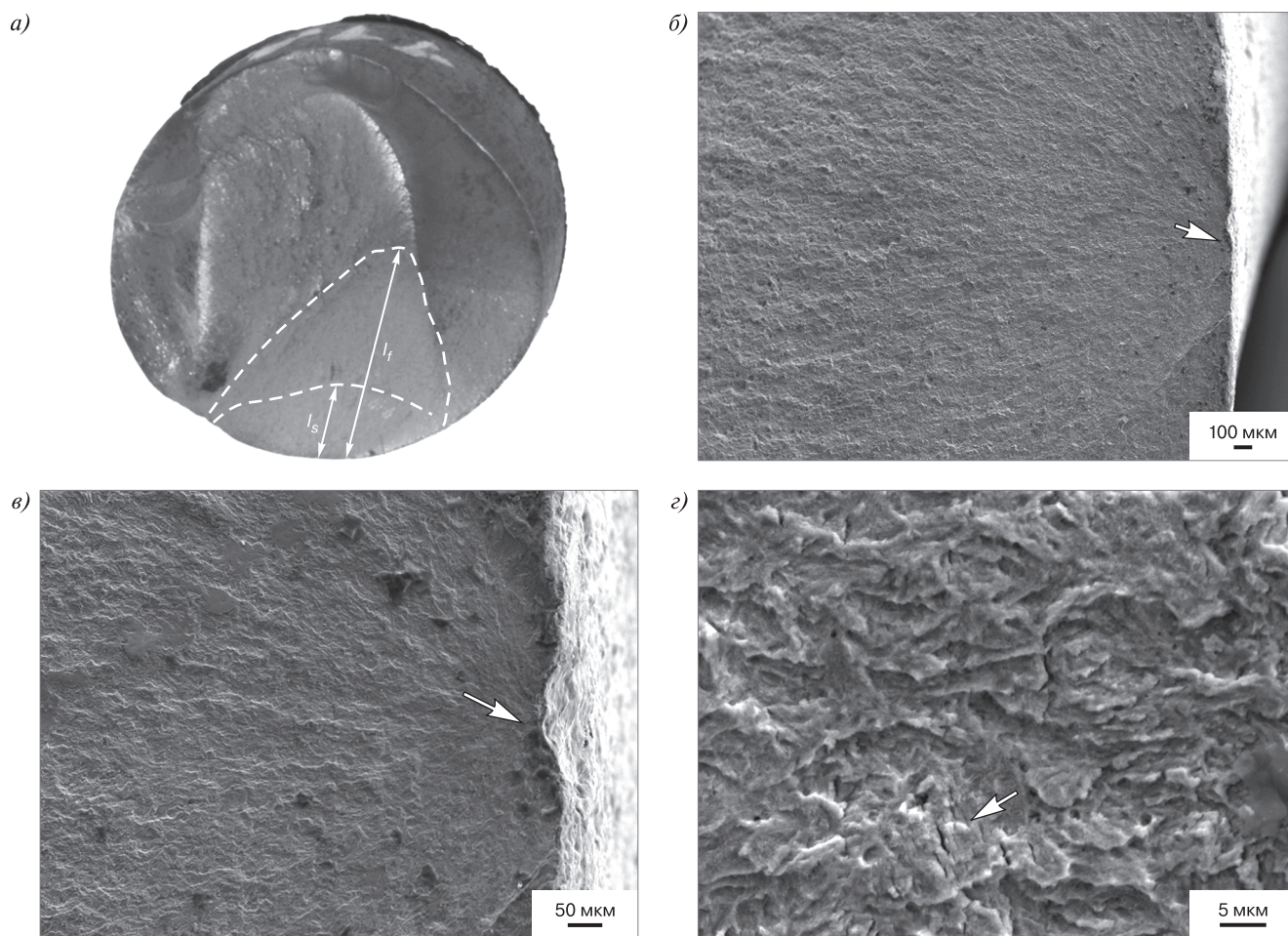


Рис. 11. Рельеф излома клеммы № 11\*:  
*а* — общий вид; *б, в* — зона зарождения; *г* — зона стабильного роста  $l_s$   
 \* Источник: данные авторов

Fig. 11. Fracture surface relief of clamp No. 11\*:  
*a* — macro view; *б, в* — origin zone; *г* — stable crack growth  $l_s$  zone  
 \* Source: authors' data

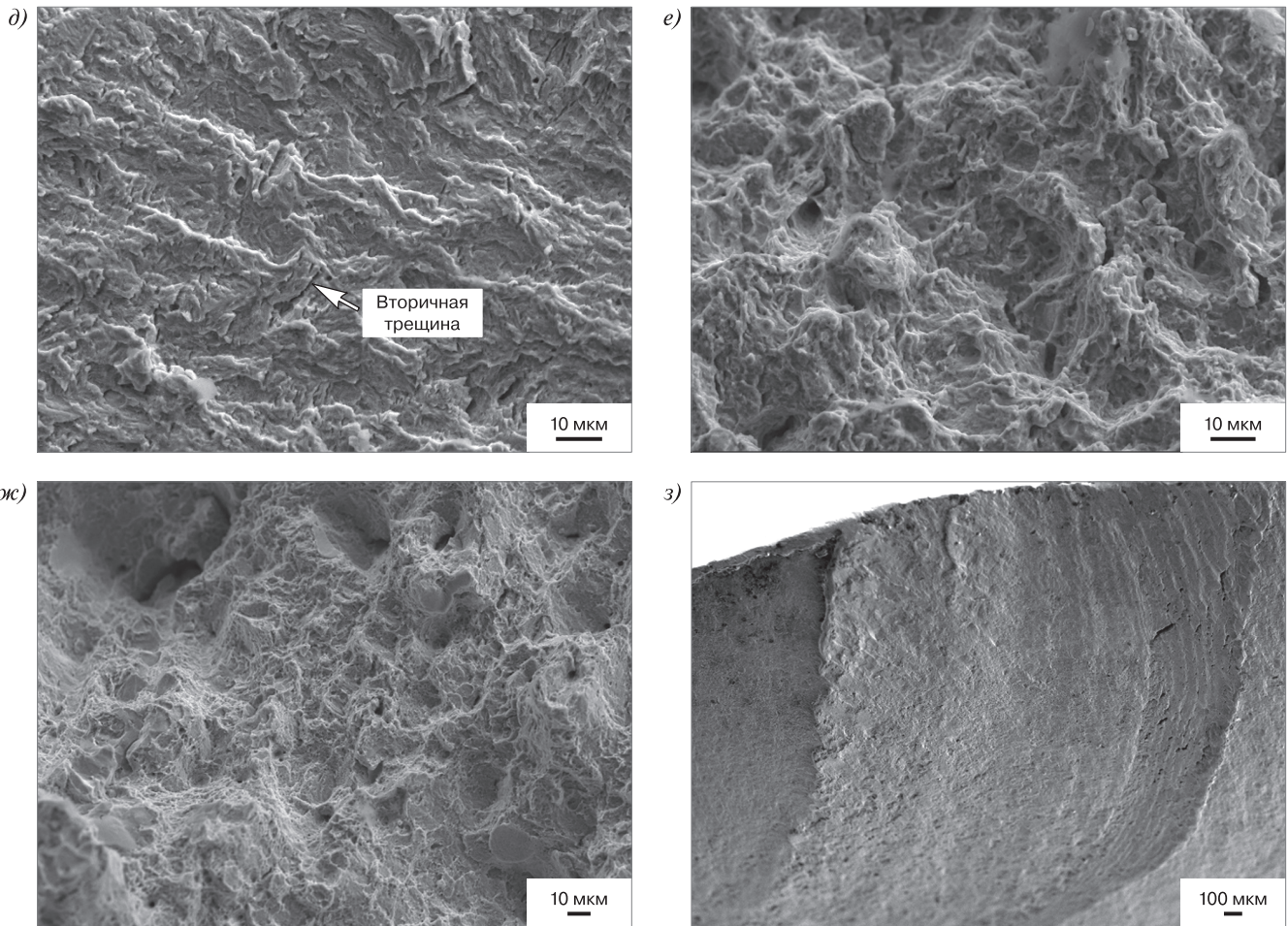


Рис. 11. (Окончание). Рельеф излома клеммы № 11\*:  
 д — зона стабильного роста  $l_s$ ; е — зона ускоренного роста  $l_f$ ; ж — зона долома; з — периферийная область  
 \* Источник: данные авторов

Fig. 11. (Final part). Fracture surface relief of clamp No. 11\*:  
 д — stable crack growth  $l_s$  zone; е — accelerated crack growth  $l_f$  zone; ж — final rupture zone; з — peripheral area  
 \* Source: authors' data

Как показали результаты настоящей работы, наличие неметаллических включений и дефектов боковой поверхности клемм может оказывать влияние на изменение усталостных свойств и преждевременное разрушение клемм и, как следствие, на характерные особенности изломов. Это согласуется с результатами работы [28], авторы которой установили, что наличие неметаллических включений, а именно их размер, оказывает существенное влияние на изменение усталостных свойств и преждевременное разрушение закаленных и отпущенных деталей.

При этом действующий на данный момент ГОСТ 33186–2014<sup>15</sup> не нормирует загрязненность неметаллическими включениями сталей, предназначенных для изготовления клемм, что представляется важным.

**Заключение.** В результате проведенного исследования установлено, что развитие рельефа усталостного разрушения клемм вне зависимости от метода усталостных испытаний (стандартный или ускоренный по методу Локати) соответствует общим закономерностям формирования рельефа изломов при усталостном разрушении и сопровождается зарождением усталостных микротрещин от включений или дефектов боковой поверхности (поверхности прутка клеммы), развитием трещин с образованием типичных усталостных бороздок в зоне усталостного разрушения и вторичных трещин, гребней, вязких ямок, участков со сглаженным сдвиговым микрорельефом в зоне ускоренного роста, а также формированием макрополос скачкообразного роста трещины.

<sup>15</sup> ГОСТ 33186–2014. Клеммы пружинные прутковые для крепления рельсов. Технические условия.

Влияние типа включений, их объемной доли и критического размера на характер усталостного разрушения и циклическую долговечность клемм требует дальнейших исследований. При этом использование ускоренного метода усталостных испытаний позволит сократить временные затраты на проведение исследований упругих клемм.

**Благодарности:** авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

**Acknowledgements:** the authors express gratitude to the reviewers for useful comments that contributed to the improvement of the article.

**Финансирование:** авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Funding:** the authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах.

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest and no financial interests in any material discussed in this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беляев М. С., Кошкин С. Б., Горбовец М. А. Определение предела усталости жаропрочного сплава способом ступенчатого изменения нагрузки // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 1 (18). С. 27–30. EDN: <https://elibrary.ru/rnecun>.
2. Belyaev M. S., Koshkin S. B., Gorbovetz M. A. Determination of superalloy fatigue strength by the loading step change method. *Aviation Materials and Technologies*. 2011;(1(18)):27–30. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/rnecun>.
3. Pollak R., Palazotto A., Nicholas T. A simulation-based investigation of the staircase method for fatigue strength testing. *Mechanics of Materials*. 2006;38(12):1170–1181. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2005.12.005>.
4. Spiteri P., Ho S., Lee Y.-L. Assessment of bending fatigue limit for crankshaft sections with inclusion of residual stresses. *International Journal of Fatigue*. 2007;29(2):318–329. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.03.009>.
5. Locati L. Le prove di fatica come ausilio alla progettazione ed alla produzione. *Metallurgia Italiana*. 1955;47(9):301–308.
6. Prot E.-M. L'essai de fatigue sous charge progressive. Une nouvelle technique d'essai des matériaux. *Revue de Métallurgie*. 1948;45(12):481–489. <https://doi.org/10.1051/metal/194845120481>.
7. Enomoto N. A method for determining the fatigue limit of metals by means of stepwise load increase tests. *Proceedings — American Society for Testing and Materials*. 1959;59:711–722.
8. Березин В. О., Замуховский А. В. Об актуальности методики ускоренных усталостных испытаний упругих клемм // Путь и путевое хозяйство. 2026. № 4. С. 14–17. EDN: <https://elibrary.ru/sqethr>.
9. Berezin V. O., Zamukhovskiy A. V. The relevance of developing a methodology for accelerated fatigue testing of elastic clamps. *Railway Track and Facilities*. 2026;(4):14–17. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/sqethr>.
10. Чернов В. А., Даниленко Д. В., Цыганская Л. В., Комиченко С. О., Ефимов В. П. Ускоренный метод испытания боковых рам инновационной тележки модели 18-9891 // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2025. Т. 22, № 3. С. 643–656. <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2025-3-643-656>. EDN: <https://elibrary.ru/zuyqes>.
11. Chernov V. A., Danilenko D. V., Cyganskaya L. V., Komichenko S. O., Efimov V. P. Accelerated test method for the side frames of the 18-9891 model innovative bogie. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2025;22(3):643–656. (In Russ.). <https://doi.org/10.20295/1815-588X-2025-3-643-656>. EDN: <https://elibrary.ru/zuyqes>.
12. Brodbeck M., Spiegel A., Hunt J., Gruenert J. Mechanical fatigue analysis comparing two locking plates in a metaphyseal fracture model of the distal ulna. *Journal of Musculoskeletal Disorders and Treatment*. 2016;2(3):16–19. <https://doi.org/10.23937/2572-3243.1510018>.
13. Topoliński T., Nowicki K. Verification of selected hypotheses attempting to explain the effect of fatigue damage build-up in trabecular bones. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1780(1):020009. <https://doi.org/10.1063/1.4965941>.
14. Бойцов Б. В. Статистический анализ точности метода ускоренных испытаний // Заводская лаборатория. 1972. Т. 38, № 9. С. 1129–1132.
15. Boytsov B. V. Statistical analysis of the accuracy of the accelerated testing method. *Industrial Laboratory*. 1972;38(9):1129–1132. (In Russ.).
16. Veramiayuk S., Paczkowska M. Analysis of factors influencing the fatigue strength of railway fastening clips. *Advancements in Civil Engineering and Technology*. 2025;6(4). <https://doi.org/10.31031/ACET.2025.06.000644>.
17. Wang X.-W., Hu Q.-F., Zhang Ch.-L., Chen L., Zhu Ch.-Y., Tao B., Jiang B., Liu Y.-Zh. Optimization of heat treatment for 38Si7 spring steel with excellent mechanical properties and controlled decarburization. *Materials*. 2022;15(11):3763. <https://doi.org/10.3390/ma15113763>. EDN: <https://elibrary.ru/zhccke>.
18. Cui Zh.-N., Kang Y.-L., Guo M.-Zh., Li B.-Sh., Qui Q.-Q., Liu R.-D., Liu H.-B. Effect of process parameters on microstructure and properties of 1500 MPa grade hot formed steel without boron but containing niobium. *Materials Science Forum*. 2019;944:283–293. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.944.283>.
19. Xiao H., Guo X., Wang H., Ling X., Wu S. Fatigue damage analysis and life prediction of E-clip in railway fasteners based on ABAQUS and FE-SAFE. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(3):168781401876724. <https://doi.org/10.1177/1687814018767249>.
20. Березин В. О., Замуховский А. В., Ефимов А. А. Выбор расчетных методов учета сложного напряженно-деформированного состояния и среднего напряжения цикла для локализации места зарождения усталостной трещины в упругой клемме // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 3. С. 199–214. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-199-214>. EDN: <https://elibrary.ru/izmvxi>.
21. Berezin V. O., Zamukhovskiy A. V., Efimov A. A. Selection of calculation methods for accounting complex stress-strain state and mean cycle stress for the origin of fatigue crack in elastic clamp localisation. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(3):199–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-199-214>. EDN: <https://elibrary.ru/izmvxi>.
22. Park Y.-Ch., An Ch., Sim H.-B., Kim M., Hong J.-K. Failure analysis of fatigue cracking in the tension clamp of a rail fastening system. *International Journal of Steel Structures*. 2019;19:1570–1577. <https://doi.org/10.1007/s13296-019-00231-5>. EDN: <https://elibrary.ru/oiozcc>.
23. Kim S.-H., Fang X.-Ju., Park Y.-Ch., Sim H.-B. Evaluation of structural behavior and fatigue performance of a KR-type rail clip. *Applied Sciences*. 2021;11(24):12074. <https://doi.org/10.3390/app112412074>. EDN: <https://elibrary.ru/dpczcv>.
24. Ostash O. P., Chepil' R. V., Hrybovs'ka V. I. On the determining parameters of serviceability of the elastic clamps of rail fasteners. *Materials Science*. 2017;53:55–61. <https://doi.org/10.1007/s11003-017-0043-5>. EDN: <https://elibrary.ru/xnwvcn>.
25. Akiniwa Y., Stanzl-Tschegg S., Mayer H., Wakita M., Tanaka K. Fatigue strength of spring steel under axial and torsional loading in the very high cycle regime. *International Journal of Fatigue*. 2008;30(12):2057–2063. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.07.004>.
26. Karr U., Schönbauer B. M., Sandajji Y., Mayer H. Effects of non-metallic inclusions and mean stress on axial and torsion very high cycle fatigue of SWOSC-V spring steel. *Metals*. 2022;12(7):1113. <https://doi.org/10.3390/met12071113>. EDN: <https://elibrary.ru/tzwjrb>.

22. Murakami Y., Endo M. Effects of defects, inclusions and inhomogeneities on fatigue strength. *International Journal of Fatigue*. 1994;16(3):163–182. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0142-1123(94)90001-9).

23. Ali R., Shehbaz T., Felicis D.D., Sebastiani M., Bemporad E. Investigations into fatigue failure in E-type fastening clips used in railway track. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2021;235(7):898–905. <https://doi.org/10.1177/0954409720967802>.

24. Березин В. О., Замуховский А. В., Ефимов А. А., Гречаник А. В. Валидация конечно-элементной модели клеммы узла промежуточного рельсового скрепления // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 2. С. 113–125. EDN: <https://elibrary.ru/zyogfn>.

Berezin V.O., Zamukhovskiy A.V., Efimov A.A., Grechanik A.V. Validation of finite-element model of clamp of rail fastening system. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(2):113–125. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/zyogfn>.

25. Андреев В. Е., Кудряшов Е. В. Создание контактной сети КС-400 для российских высокоскоростных железнодорожных магистралей // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 235–250. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-235-250>. EDN: <https://elibrary.ru/dywrie>.

Andreev V.E., Kudryashov E.V. Design and construction of the KS-400 overhead contact line for Russian high-speed railways. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):235–250. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-235-250>. EDN: <https://elibrary.ru/dywrie>.

26. Романов А. В., Киселев А. А. Прочность и устойчивость безбалластной конструкции верхнего строения бесстыкового пути высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 4. С. 262–272. <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-262-272>. EDN: <https://elibrary.ru/fqcvmj>.

Romanov A.V., Kiselev A.A. Strength and stability of continuous welded rail track of ballastless track superstructure of Moscow – Saint Petersburg high-speed main line. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(4):262–272. (In Russ.). <https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-4-262-272>. EDN: <https://elibrary.ru/fqcvmj>.

27. Кореньков Д. А., Иванников М. А., Загитов Э. Д. Разработка конструкции и технологий содержания железнодорожного пути, обеспечивающих наработку 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 12. С. 2–6. EDN: <https://elibrary.ru/mknjnj>.

Korenkov D.A., Ivannikov M.A., Zagitov E.D. Design and maintenance technology for railway track providing 2.5 billion gross tons of passing tonnage. *Railway Track and Facilities*. 2024;(12):2–6. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/mknjnj>.

28. Linhart V., Mikulova D., Cerny I. Effect of inclusions on fatigue strength of heat treated components. *Communications*. 2010;12(4):55–61. <https://doi.org/10.26552/com.C.2010.4.55-61>.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Людмила Рафаиловна БОТВИНА,

д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук (119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49), SPIN-код: 8760-2586, <https://orcid.org/0000-0001-7717-0719>

### Юлия Андреевна ДЕМИНА,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук (119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49), SPIN-код: 1199-8847, <https://orcid.org/0000-0002-0326-3071>

### Вадим Олегович БЕРЕЗИН,

аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство», Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), SPIN-код: 2620-0199, <https://orcid.org/0009-0008-1831-6093>

### Марат Равилевич ТЮТИН,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук (119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49), SPIN-код: 3545-9114, <https://orcid.org/0000-0002-0631-4794>

### Александр Владимирович ЗАМУХОВСКИЙ,

канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», Российский университет транспорта (ПУТ (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), SPIN-код: 4211-6690

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Ludmila R. BOTVINA,

Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (IMET RAS, 119334, Moscow, 49, Leninsky Ave.), SPIN-code: 8760-2586, <https://orcid.org/0000-0001-7717-0719>

### Yulia A. DEMINA,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (IMET RAS, 119334, Moscow, 49, Leninsky Ave.), SPIN-code: 1199-8847, <https://orcid.org/0000-0002-0326-3071>

### Vadim O. BEREZIN,

Postgraduate, Track and Track Facilities Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obratsova St.), SPIN-code: 2620-0199, <https://orcid.org/0009-0008-1831-6093>

### Marat R. TYUTIN,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (IMET RAS, 119334, Moscow, 49, Leninsky Ave.), SPIN-code: 3545-9114, <https://orcid.org/0000-0002-0631-4794>

### Alexander V. ZAMUKHOVSKY,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Track and Track facilities Department, Russian University of Transport (127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obratsova St.), SPIN-code: 4211-6690

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Людмила Рафаиловна БОТВИНА.** Постановка целей и задач исследования, поиск научных источников, подготовка литературного обзора, анализ результатов, написание текста статьи, обсуждение результатов, формирование выводов (30 %).

**Юлия Андреевна ДЕМИНА.** Исследование и анализ макро- и микроизломов, редактирование текста статьи (20 %).

**Вадим Олегович БЕРЕЗИН.** Поиск научных источников, подготовка литературного обзора, обсуждение результатов, написание текста статьи, формирование выводов (20 %).

**Марат Равилевич ТЮТИН.** Анализ макроизломов, поиск научных источников, редактирование текста статьи (15 %).

**Александр Владимирович ЗАМУХОВСКИЙ.** Поиск научных источников, обсуждение результатов, редактирование текста статьи (15 %).

**Alexander V. ZAMUKHOVSKY.** Searching for scientific sources, results discussion, article editing (15 %).

### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Ludmila R. BOTVINA.** Research goals and objectives setting, scientific sources search, preparation of literature review, results analysis and discussion, article writing, conclusions formulation (30 %).

**Yulia A. DEMINA.** Investigation and analysis of macro- and micro-relief of fracture surface, article editing (20 %).

**Vadim O. BEREZIN.** Scientific sources search, preparation of literature review, results discussion, article writing, conclusions formulation (20 %).

**Marat R. TYUTIN.** Analysis of macrorelief of fracture surface, scientific sources search, article editing (15 %).

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*The authors have read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию 27.10.2025, рецензия от первого рецензента получена 27.01.2026, рецензия от второго рецензента получена 02.02.2026, рецензия от третьего рецензента получена 06.02.2026, принята к публикации 16.02.2026.

The article was submitted 27.10.2025, first review received 27.01.2026, second review received 02.02.2026, third review received 06.02.2026, accepted for publication 16.02.2026.