CC BY 4.0

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья
УДК 625.143.54
EDN: https://elibrary.ru/izmvxi
DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-199-214
Научная специальность: 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Выбор расчетных методов учета сложного напряженно-деформированного состояния и среднего напряжения цикла для локализации места зарождения усталостной трещины в упругой клемме

В. О. Березин[1]✉, А. В. Замуховский[1], А. А. Ефимов[2]

[1]Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация
[2]Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта (АО «ИЦ ЖТ»),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведен обоснованный выбор методов учета сложного напряженно-деформированного состояния и среднего напряжения цикла в расчетах упругих клемм узлов промежуточных рельсовых скреплений, связанных с локализацией потенциально критических мест по условию усталостной долговечности. Определены методы, которые позволяют наиболее точно локализовать места усталостных изломов упругих клемм.
Материалы и методы. В качестве исследуемой клеммы была выбрана упругая клемма ЦП 369.102 (клемма ЖБР-65). Выбор возможных методов учета сложного напряженно-деформированного состояния и учета влияния среднего напряжения цикла проведен посредством обзора и анализа существующих методов. Для проведения виртуальных испытаний разработана конечно-элементная модель упругой клеммы. Проведены натурные усталостные испытания упругих клемм. Для сравнения результатов натурных усталостных испытаний клемм и виртуального эксперимента применялось 3D-сканирование изломанных фрагментов клемм.
Результаты. Установлено, что экземпляры упругой клеммы ЦП 369.102 при натурных испытаниях на усталостную долговечность разрушались в двух различных зонах с вероятностью 5 и 95 %. Результаты расчетов, выполненных с использованием комбинаций методов учета сложного напряженно-деформированного состояния и влияния среднего напряжения цикла, показали удовлетворительное совпадение с экспериментально определенными местами зарождения усталостных трещин в клеммах.
Обсуждение и заключение. Определены комбинации методов учета сложного напряженно-деформированного состояния и учета влияния среднего напряжения цикла, которые позволяют при проведении расчетов локализовать потенциально критические с точки зрения усталостной долговечности места упругой клеммы. Запланированы дальнейшие исследования по разработке на основе текущих результатов модели для упругой клеммы, позволяющей с достаточной степенью точности оценивать ее долговечность.

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

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-199-214.

✉ berezin.vadim@bk.ru (В. О. Березин)

© Березин В. О., Замуховский А. В., Ефимов А. А., 2025

CC BY 4.0

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article
UDK 625.143.54
EDN: https://elibrary.ru/izmvxi
DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-199-214
Scientific specialty: 2.9.2. Railway track, survey and design of railways

Selection of calculation methods for accounting complex stress-strain state and mean cycle stress for the origin of fatigue crack in elastic clamp localisation

Vadim O. Berezin[1]✉, Alexander V. Zamukhovsky[1], Andrey A. Efimov[2]

[1]Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation
[2]Engineering Centre of Railway Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The authors conducted valid accounting methods choice of complex stress-strain state and mean stress in the calculations of elastic clamps of intermediate rail fastenings nodes connected with the localisation of potentially critical sites under the condition of fatigue durability. Methods that enable to most accurately localise places of fatigue fractures has been determined.
Materials and methods. The elastic clamp CP 369.102 (clamp ZhBR-65) was chosen as the clamp under study. The selection of potential methods for accounting complex stress-strain state and mean cycle stress for the origin of a fatigue crack in an elastic clamp localisation was carried out through a review and analysis of existing approaches. A finite element model of the elastic clamp was developed for conducting virtual tests. Full-scale fatigue tests of the elastic clamps were performed according to the developed test procedure. In order to compare the results of the full-scale fatigue tests and the virtual experiments, 3D scanning of the fractured clamp fragments was employed.
Results. It was established that samples of the elastic clamp CP 369.102, when subjected to full-scale fatigue life tests, failed in two distinct zones with probabilities of 5 % and 95 %, respectively. The results of calculations performed using combined methods for accounting complex stress-strain states and the influence of mean cycle stress demonstrated satisfactory correlation with the experimentally determined locations of fatigue crack initiation in the clamps.
Discussion and conclusion. Combinations of methods for accounting for complex stress-strain states and the influence of mean cycle stress were identified, which allow to localise potentially critical zones of the elastic clamp in terms of fatigue durability during calculations. Further research is planned and aimed at developing a model for the elastic clamp that would enable a sufficiently accurate assessment of its service life based on the current results.

KEYWORDS: railway fastening, clamp, complex stress-strain condition, mean stress, fatigue durability

FOR CITATION: Berezin V. O., Zamukhovsky 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.). DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-199-214.

✉ berezin.vadim@bk.ru (V. O. Berezin)

© Berezin V. O., Zamukhovsky A. V., Efimov A. A., 2025

Введение. Нагружение упругой клеммы при эксплуатации включает в себя преднагружение монтажным усилием и сопровождается обусловленными нагрузками от подвижного состава, содержащими в себе циклы догружения и частичной разгрузки. Указанные нагрузки вызывают сложное напряженно-деформированное состояние (далее — НДС). При этом монтажное прижатие вызывает большую часть от максимальных действующих напряжений, обуславливает средние напряжения цикла и оказывает значительное влияние на усталостную долговечность клеммы [1–3]. В настоящей работе на примере клеммы ЦП 369.102 (клемма ЖБР-65), изготовленной из стали 60С2А, приведен анализ применимости методов учета сложного НДС и влияния среднего напряжения цикла в расчетах, связанных с определением места зарождения усталостной трещины в клемме.

В рассмотренных статьях иностранных авторов, посвященных анализу усталостной долговечности клеммы [1, 4–10], рассматривался вопрос о применяемых методах оценки сложного НДС и учета влияния среднего напряжения цикла при циклическом нагружении клеммы. В отечественных источниках не найдено научных трудов, посвященных применению рассмотренных методов для исследования упругих клемм.

Основные методы учета влияния среднего напряжения цикла на циклическую долговечность конструкции приведены в работе [11]: ASME, SWT, Багчи (Bagci), Гербера (Gerber), Гудмана (Goodman), Морроу (Morrow), Содерберга (Soderberg), Смита (Smith), Уолкера (Walker), а также методы Халф-слоуп (Half-slope) и линейный (Linear).

В [12] автор провел обзор основных методов учета сложного НДС при циклическом нагружении: максимальных касательных напряжений (критерий Треска́), эквивалентных напряжений по Мизесу, максимальных главных напряжений и критической плоскости [13–15].

В [5] для клеммы Type 2 в качестве метода оценки сложного НДС применен метод критической плоскости с использованием критерия Брауна–Миллера (Brown–Miller) [14], а в качестве метода учета влияния среднего напряжения цикла — метод Морроу. Авторы приводят распределение усталостных долговечностей для клеммы, полученное в результате расчета, и фото нехарактерного усталостного излома клеммы в эксплуатации. Вопросы применимости расчетных методов остались открытыми.

Метод критической плоскости с использованием критерия Брауна–Миллера и метод учета влияния среднего напряжения цикла были применены и в работах [6, 7] для клеммы SKL-15. Авторы в обеих статьях сравнили определенное расчетом место с минимальной усталостной долговечностью с фактическим местом усталостного излома клеммы, полученным при эксплуатации, а также выявили их совпадение.

В работе [1] для клеммы SKL-15 приведены расчетное распределение размаха максимальных главных деформаций между затянутым положением клеммы и положением разгрузки клеммы при проезде подвижного состава, а также фотография усталостного излома клеммы. Место усталостного излома совпадало с областью наибольшего значения максимальных главных деформаций, а также с областями с наименьшими значениями усталостных долговечностей из работ [6, 7]. Авторы не получали эквивалентную симметричному циклу амплитуду напряжений или деформаций, что не дало возможности учесть влияние среднего напряжения цикла на наиболее нагруженные участки клеммы при циклическом нагружении. Цели авторов позволяли использовать упрощенный подход (построение диаграммы предельных амплитуд напряжений) с использованием методов Гудмана и Гербера для качественного определения неограниченной или ограниченной усталостной долговечности клемм. По данным источника [1] указанные методы не обладают высокой точностью.

В работе [4] для клеммы SKL-15 приведены расчетные распределения максимальных главных деформаций, максимальных касательных напряжений и эквивалентных напряжений по Мизесу для монтажного положения клеммы, положения клеммы, в котором она воспринимает догружение от изгиба рельса при движении подвижного состава при нахождении колеса перед узлом скрепления, и для других положений. В работе представлена фотография места усталостного излома клеммы, аналогичного приведенным в работах [1, 6, 7, 16]. Области с наибольшими значениями максимальных главных деформаций, максимальных касательных напряжений и эквивалентных напряжений по Мизесу совпадают с местом усталостного излома клеммы. Однако в работе [4] сравнение фактического места излома клеммы SKL-15 с местом максимальных значений вышеописанных распределений проводится для указанных выше состояний клеммы (например, в затянутом положении клеммы). При такой оценке отсутствует информация об амплитуде напряжений и среднем напряжении цикла для клеммы, что приводит к невозможности определения эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений. Это не позволяет учитывать особенности циклического нагружения клеммы. В упомянутой работе оценка усталостных характеристик клеммы осуществляется с помощью диаграммы предельных амплитуд напряжений. Для построения диаграммы выбран метод Гудмана, который по соображениям, высказанным в [1], является неточным и консервативным. Там же приводится информация о более точных методах учета

влияния среднего напряжения цикла, таких как SWT, линейный и Уолкера. При этом в открытых источниках не найдено работ с использованием данных методов для усталостного анализа клемм, что наводит на мысль о проверке адекватности этих методов.

В работе [8] авторы для учета сложного НДС клеммы SKL-1 применяют расчет эквивалентных напряжений по Мизесу, а для учета влияния среднего напряжения цикла — методы Гудмана, Гербера и Содерберга. Авторы не приводят сравнения фотографий мест усталостных изломов с результатами расчетов.

В работах [9, 10] при усталостном анализе упругих клемм Pandrol E-clip и Fastclip в качестве метода для учета сложного НДС применяется метод критической плоскости с использованием критерия Фатеми–Соси [15], который учитывает влияние среднего напряжения цикла [15, 17]. В [9] получены значения усталостных долговечностей для наиболее нагруженных участков клемм, однако сравнение фотографий усталостных изломов клемм E-clip и Fastclip проведено с распределениями максимальных касательных напряжений в заданных состояниях нагружения аналогично работе [4], что также не позволяет учесть амплитуду напряжений и среднее напряжение цикла.

В работе [9] для клеммы E-clip фирмы Pandrol места усталостных изломов совпадают с зоной с наибольшими значениями максимальных касательных напряжений в конечно-элементной модели (далее — КЭМ), в то время как для клеммы Fastclip место усталостного излома не совпадает с зоной с наибольшим значением максимальных касательных напряжений.

В работе [10] авторы получили распределения максимальных касательных и главных деформаций после затяжки клеммы E-clip, также для указанной клеммы получено распределение фактора повреждаемости по критерию Фатеми–Соси при циклическом нагружении. Авторы приводят фото усталостного излома упругой клеммы E-clip, который совпадает с наибольшими значениями максимальных касательных и главных деформаций, а также с наибольшим значением фактора повреждаемости по критерию Фатеми–Соси.

Следует также отметить, что в работах [2, 18, 19, 20] для клеммы E-clip приведенные области с наибольшими значениями эквивалентных напряжений по Мизесу совпадают с областью наибольших значений максимальных касательных напряжений из работы [9] и с областями с наибольшими значениями максимальных касательных и главных деформаций, а также с наибольшим значением фактора повреждаемости по критерию Фатеми–Соси из работы [10]. Кроме того, в работе [2] приведены распределения усталостных долговечностей для клеммы E-clip. Авторы данной работы не указали примененный ими метод учета сложного НДС, а в качестве метода учета влияния среднего напряжения цикла использовали метод Гудмана, о недостатках которого написано выше. Область с наименьшими значениями усталостных долговечностей совпала с местами усталостных изломов для клеммы E-clip из работ [9, 10, 18]. При этом стоит отметить, что при близком нахождении относительно друг друга места усталостных разрушений, приведенные в работах [10, 18], не совпадают с аналогичными местами усталостных разрушений в работе [9].

В работе [3] авторы при сравнении распределения размаха максимальных главных напряжений между затянутым положением клеммы и положением разгрузки клеммы при проезде подвижного состава установили совпадение областей с наибольшими значениями напряжений с местами усталостных изломов клемм KR. Однако авторы не получали амплитуду напряжений цикла и среднее напряжение цикла, что не дало возможности оценить влияние среднего напряжения цикла на фактическое место усталостного излома и определить потенциально критические места клеммы при циклическом нагружении.

С учетом вышеизложенного, очевидно, что задача выбора метода учета сложного НДС при циклическом нагружении клемм и метода учета влияния среднего напряжения цикла для локализации места зарождения усталостной трещины является актуальной и требует дальнейшего изучения. Цель настоящей работы состоит в определении комбинации методов, с помощью которых возможно наиболее точно локализовать места усталостных изломов клемм.

Предлагается подход, состоящий в последовательном решении следующих задач:

- анализ методов учета влияния среднего напряжения цикла;
- анализ методов учета сложного НДС при циклическом нагружении;
- разработка КЭМ упругой клеммы;
- проведение расчетов методом конечных элементов для клеммы с определением эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений или фактора повреждаемости (для метода критической плоскости) при циклическом нагружении;
- подготовка и проведение натурных усталостных испытаний упругих клемм;
- сравнение мест зарождения усталостных трещин в клеммах при натурном эксперименте с наибольшими значениями эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений или фактора повреждаемости при виртуальном эксперименте.

Материалы и методы, описание объекта испытания. В качестве объекта исследования выбрана серийно используемая на сети железных дорог Российской Федерации упругая клемма ЦП 369.102 (клемма ЖБР-65), представленная на рис. 1.

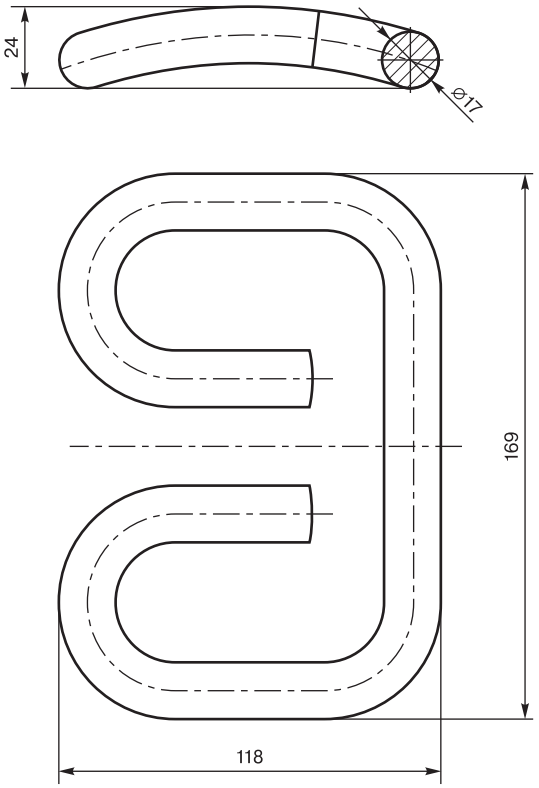

Рис. 1. Эскиз клеммы ЦП 369.102 (клемма ЖБР-65)*
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 1. Clamp CP 369.102 sketch (ZhBR-65 clamp)*
* Source: compiled by the authors according to the research

Указанная клемма способна обеспечивать усилие прижатия рельса не менее 12,5 кН, что отвечает требованиям ГОСТ 33186–2014[1] в части требований к характеристикам клеммы и ГОСТ 32698–2014[2] в части требований безопасности к промежуточным рельсовым скреплениям (усилие монтажного прижатия рельса к шпале от двух клемм — не менее 25 кН, которое обеспечивается конструктивными мерами).

Выбор методов учета сложного НДС при циклическом нагружении. Для проведения сравнительного анализа в качестве методов учета сложного НДС при циклическом нагружении для клеммы выбраны четыре главных метода, представленных в работе [12]:

- метод максимальных главных напряжений;
- метод эквивалентных напряжений по Мизесу;
- метод максимальных касательных напряжений (критерий Треска́);
- метод критической плоскости.

Для метода критической плоскости существует несколько критериев: критерий Брауна–Миллера (Brown–Miller), Фатеми–Соси (Fatemi–Socie), Данг Вана (Dang Van) [21], МакДиармида (McDiarmid) [22] и другие. В настоящей статье для метода критической плоскости рассмотрены критерии, упомянутые во введении при анализе научных статей, а именно — Брауна–Миллера (1) и Фатеми–Соси (2):

$$\frac{\Delta\gamma}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n}{2} = f(2N_f), \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\gamma}{2}\left(1 + k\frac{\sigma_{n\,\max}}{\sigma_y}\right) = f(2N_f), \quad (2)$$

где $\frac{\Delta\gamma}{2}$ — амплитуда сдвиговой деформации;

$\frac{\Delta\varepsilon_n}{2}$ — амплитуда нормальной деформации;

$2N_f$ — цикл нагружения;

$\sigma_{n\,\max}$ — максимальное нормальное напряжение;

k — коэффициент, определяющий влияние нормального напряжения;

σ_y — предел текучести материала.

Коэффициент k в настоящем исследовании принят равным 0,5 [23, 24]. Предел текучести приведен в работе [25].

Выбор методов учета влияния среднего напряжения цикла. Исходя из информации выше, критерий Фатеми–Соси для метода критической плоскости учитывает влияние среднего напряжения цикла.

Для критерия Брауна–Миллера выбран метод учета влияния среднего напряжения цикла, предложенный в работе [26]:

$$\frac{\Delta\gamma\tau_{\max}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_n\sigma_{n\,\max}}{2} = f(2N_f), \quad (3)$$

где $\tau_{\max}$ — максимальное касательное напряжение;

$\sigma_{n\,\max}$ — максимальное нормальное напряжение.

Для методов максимальных главных напряжений, эквивалентных напряжений по Мизесу и максимальных касательных напряжений рассмотрены методы учета влияния среднего напряжения цикла, представленные в табл. 1 согласно [1], а также метод уравнения схематизированной диаграммы предельных амплитуд напряжений при асимметричных циклах[3].

Согласно [1], наиболее точным методом из приведенных в табл. 1 является метод Уолкера. Величину $1 - \gamma$ в данном методе можно рассматривать как меру чувствительности материала к среднему напряжению

[1] 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. 6 с.

[2] 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. 10 с.

[3] Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.

Таблица 1

Методы учета среднего напряжения цикла*

Table 1

Mean stress accounting methods*

Наименование метода	Формула	Пояснение
ASME	$\sigma_{ar} = \dfrac{\sigma_a}{\left(1 - \left(\dfrac{\sigma_m}{\sigma_т}\right)^2\right)^{1/2}}$	σ_{ar} — эквивалентная симметричному циклу амплитуда напряжений; σ_a — амплитуда напряжений цикла при рассматриваемом виде нагружения; σ_m — среднее напряжение цикла; $\sigma_т$ — предел текучести материала
Багчи	$\sigma_{ar} = \dfrac{\sigma_a}{1 - \left(\dfrac{\sigma_m}{\sigma_т}\right)^4}$	–
Гербер	$\sigma_{ar} = \dfrac{\sigma_a}{1 - \left(\dfrac{\sigma_m}{\sigma_в}\right)^2}$	$\sigma_в$ — предел прочности материала
Гудман	$\sigma_{ar} = \dfrac{\sigma_a}{1 - \dfrac{\sigma_m}{\sigma_в}}$	–
Халф-слоуп	$\sigma_{ar} = \dfrac{\sigma_a}{1 - \dfrac{\sigma_m}{2\sigma_в}}$	–
Линейный	$\sigma_{ar} = \dfrac{\sigma_a}{1 - \dfrac{\sigma_m}{M}}$	M — коэффициент, зависящий от свойств материала
Морроу	$\sigma_{ar} = \dfrac{\sigma_a}{1 - \dfrac{\sigma_m}{\sigma'_f}}$	σ'_f — истинный предел прочности материала
Содерберг	$\sigma_{ar} = \dfrac{\sigma_a}{1 - \dfrac{\sigma_m}{\sigma_т}}$	–
Смит	$\sigma_{ar} = \dfrac{\sigma_a\left(1 + \dfrac{\sigma_m}{\sigma_в}\right)}{1 - \dfrac{\sigma_m}{\sigma_в}}$	–
SWT	$\sigma_{ar} = \sqrt{(\sigma_m + \sigma_a)\sigma_a}$	–
Уолкер	$\sigma_{ar} = (\sigma_m + \sigma_a)^{1-\gamma}\sigma_a^{\gamma}$	γ — коэффициент, зависящий от свойств материала

* Источник: составлено авторами по материалам исследования
* Source: compiled by the authors according to the research

цикла. Значения γ могут варьироваться от 0 до 1, но для металлов обычно находятся в диапазоне от 0,4 до 0,8 [27].

Предварительно коэффициент γ можно оценить по следующей формуле [27]:

$$\gamma = -0{,}0002\sigma_в + 0{,}8818. \quad (4)$$

В работе [27] авторы пишут о том, что при $\gamma = 0{,}5$ метод Уолкера преобразуется в метод SWT.

Авторами работы [1] отмечено, что модель SWT не содержит параметров, характеризующих свойства материала, а полученные результаты точнее, чем для большинства методов, представленных в табл. 1. Указанный метод широко используется на практике.

В частности, для материала 60С2А (рессорно-пружинная сталь) с пределом прочности $\sigma_в$, равным 1760 МПа, значение γ согласно формуле (4) будет составлять 0,5298 [27]. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что методы Уолкера и SWT дают практически одинаковые результаты для данной марки стали с текущим режимом термообработки, разница между методами составляет 5,9 %, при этом обработка данных и получение результатов по методу SWT представляется авторам предпочтительной с точки зрения удобства.

Эквивалентную симметричному циклу амплитуду напряжений σ_{ar}, соответствующую испытаниям со средним напряжением σ_m, также можно определить, используя уравнение схематизированной диаграммы предельных амплитуд напряжений при асимметричных циклах[4]:

$$\sigma_{ar} = \sigma_a + \varphi_\sigma \sigma_m, \quad (5)$$

где φ_σ — коэффициент чувствительности металла к асимметрии цикла.

Коэффициент φ_σ характеризует влияние асимметрии цикла на предельную амплитуду напряжений. Значения коэффициента φ_σ для углеродистых сталей φ_σ находятся в диапазоне от 0,1 до 0,2[5].

Значения коэффициента φ_σ, согласно опытным данным, зависят от статической прочности материала, базы испытаний и уровня среднего напряжения цикла. Отмечено, что асимметрия цикла более существенно сказывается на сопротивлении усталости материала на малых базах[6].

На основании приведенной выше информации для таких методов, как максимальные главные напряжения, эквивалентные напряжения по Мизесу и максимальные касательные напряжения, для дальнейшего сравнения стоит определить следующие методы:

[4] Когаев В. П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.
[5] Там же.
[6] Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний: справочник. М.: Металлургия, 1978. 304 с.

Таблица 2

Комбинации методов учета сложного НДС и методов учета влияния среднего напряжения цикла*

Table 2

Combinations of methods for accounting complex stress-strain states and methods for accounting mean cycle stress*

Комбинация, п/п	Метод учета сложного НДС	Метод учета влияния среднего напряжения цикла
№ 1	Максимальные главные напряжения	SWT
№ 2	Эквивалентные напряжения по Мизесу	SWT
№ 3	Максимальные касательные напряжения	SWT
№ 4	Максимальные главные напряжения	Уравнение схематизированной диаграммы предельных амплитуд напряжений при асимметричных циклах
№ 5	Эквивалентные напряжения по Мизесу	Уравнение схематизированной диаграммы предельных амплитуд напряжений при асимметричных циклах
№ 6	Максимальные касательные напряжения	Уравнение схематизированной диаграммы предельных амплитуд напряжений при асимметричных циклах
№ 7	Метод критической плоскости (критерий Брауна–Миллера)	$\frac{\Delta\gamma\tau_{max}}{2}+\frac{\Delta\varepsilon_n\sigma_{n\,max}}{2}$
№ 8	Метод критической плоскости (критерий Фатеми–Соси)	Метод учета сложного НДС учитывает влияние среднего напряжения цикла

* Источник: составлено авторами по материалам исследования
* Source: compiled by the authors according to the research

SWT и уравнения схематизированной диаграммы предельных амплитуд напряжений при асимметричных циклах с коэффициентом чувствительности металла к асимметрии цикла φ_σ. Исходя из того, что для стали 60С2А данный коэффициент неизвестен, его значение принято равным 0,15 (среднее значение диапазона возможных значений).

В результате для дальнейшего анализа и сравнения были сформированы восемь комбинаций методов учета сложного НДС и влияния среднего напряжения цикла, приведенных в табл. 2.

Описание КЭМ упругой клеммы. Подробное описание подхода к разработке, верификации и валидации конечно-элементной модели клеммы дано в работе [25]. В соответствии с этим подходом для анализа циклического нагружения упругой клеммы приведена ее КЭМ (рис. 2).

Далее выполняются три последовательных шага нагружения:

- затяжка упругой клеммы перемещением имитатора нагружающего приспособления (шаг № 1);

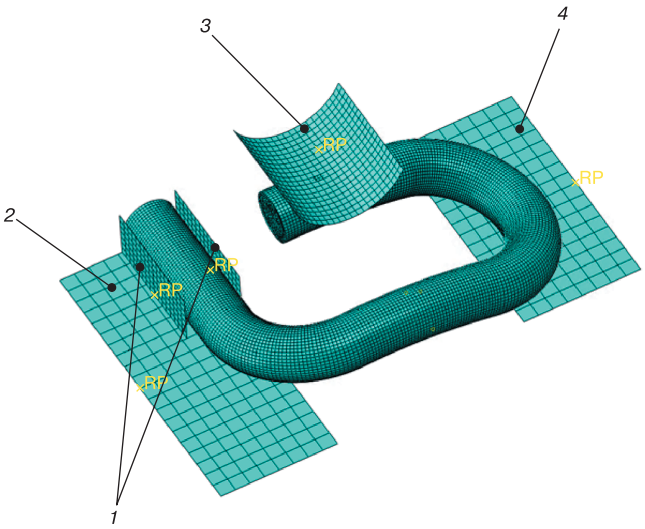

Рис. 2. Конечно-элементная модель клеммы (половина)*:
1 — ограничители смещения клеммы; *2* — имитатор поверхности рельса; *3* — имитатор нагружающего приспособления; *4* — имитатор поверхности упора
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 2. Finite element model of the clamp (half)*:
1 — clamp displacement limiters; *2* — rail surface simulator; *3* — load simulator device; *4* — angle guide plate surface simulator
* Source: compiled by the authors according to the research

- перемещение имитатора поверхности рельса вверх (шаг № 2);
- перемещение имитатора поверхности рельса вниз (шаг № 3).

Шаг № 1 имитирует затяжку клеммы в узле скрепления. Шаги № 2 (догружение) и № 3 (разгружение) имитируют работу клеммы в узле скрепления при проезде подвижного состава.

Описание натурного испытания упругих клемм на усталость. Перед испытаниями на усталость клеммы нагружали три раза согласно схеме, приведенной в работе [25]. После контроля величины остаточной деформации клеммы допускались до усталостных испытаний.

Усталостные испытания упругих клемм ЦП 369.102 проводились согласно схемам, представленным на рис. 3. и рис. 4.

После установки клемм на испытательную установку и затяжки прикрепителей приступают к проведению испытаний.

Перед началом испытаний шток испытательной машины поднимали вверх до достижения усилия на штоке 25 кН (по 12,5 кН на каждую из клемм) — положение штока № 1 согласно рис. 4 (положение соответствует шагу № 1 в КЭМ клеммы при выполнении анализа). Далее начиналось циклическое нагружение, в процессе которого шток испытательной машины многократно перемещался между положениями № 2 и № 3.

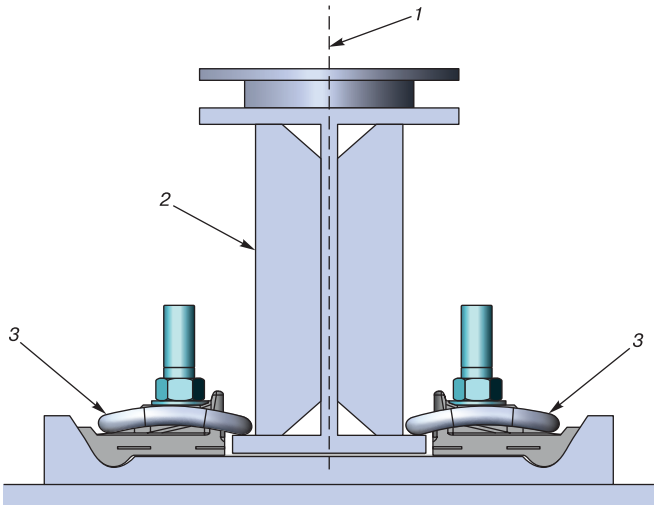

Рис. 3. Схема установки клемм на испытательную машину*:
1 — ось штока испытательной машины; *2* — нагружающее приспособление; *3* — клемма
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 3. Scheme of clamps installation on the testing machine*:
1 — testing machine rod axis; *2* — loading device; *3* — clamp
* Source: compiled by the authors according to the research

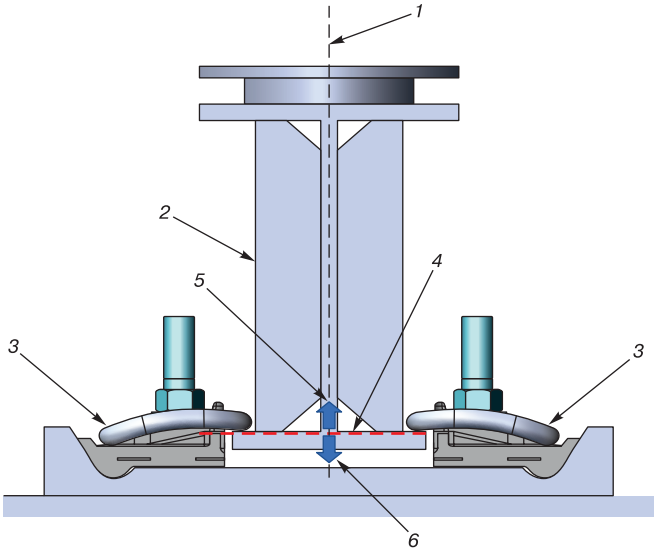

Рис. 4. Схема циклического нагружения клемм при испытаниях на усталость*:
1 — ось штока испытательной машины; *2* — нагружающее приспособление; *3* — клемма; *4* — положение штока № 1; *5* — направление перемещение штока к положению № 2; *6* — направление перемещение штока к положению № 3
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 4. Scheme of cyclic loading of clamps during fatigue tests*:
1 — testing machine rod axis; *2* — loading device; *3* — clamp; *4* — rod position No. 1; *5* — direction of rod movement toward position No. 2; *6* — direction of rod movement toward position No. 3
* Source: compiled by the authors according to the research

База испытаний составляла 2 миллиона циклов согласно ГОСТ 33186–2014.

Положение штока № 2 (догружение клеммы) соответствует перемещению вверх относительно положения № 1 на величину, равную 10 % от задаваемого размаха перемещений для конкретного испытания (положение соответствует шагу № 2 в КЭМ клеммы).

Положение штока № 3 (разгружение клеммы) соответствует перемещению вниз относительно положения № 1 на величину, равную 90 % от задаваемого размаха перемещений для конкретного испытания (положение соответствует шагу № 3 в КЭМ клеммы).

По причине того, что ГОСТ 33186–2014 не предъявляет требований к соотношению перемещений догружения и разгружения клеммы, оно было выбрано авторами в соответствии с DBS 918–127[7] (нормативный документ национального железнодорожного оператора Германии).

Фото стенда циклического нагружения клемм представлено на рис. 5

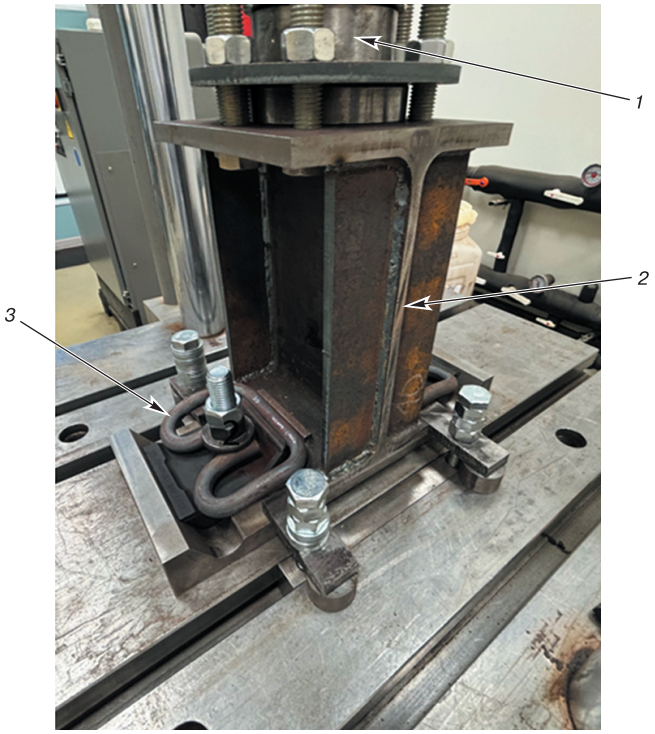

Рис. 5. Стенд циклического нагружения клемм ЦП 369.102*:
1 — шток испытательной машины; *2* — нагружающее приспособление; *3* — клемма
* Источник: фото авторов

Fig. 5. Cyclic loading stand for CP 369.102 clamps fatigue testing*:
1 — testing machine rod; *2* — loading device; *3* — clamp
* Source: authors' photo

[7] DBS 918–127. Rail fastenings made of spring steel. Rail clips, tension clips, spring clips: Federal Railway Authority, January 2021. URL: https://www.deutschebahn.com/resource/blob/6893394/47c33650ffc9416e71825854f59ac996/DBS918127_V4_0_EN_US-data.pdf (дата обращения: 01.08.2025).

В процессе усталостных испытаний наблюдалось снижение усилия на штоке испытательной машины, которое могло достигать 3 % от номинального усилия. Это может быть связано с эффектом релаксации напряжений в клеммах, а также с постепенным накоплением усталостных повреждений. Компенсация снижения усилия не проводилась в целях недопущения пауз при циклических испытаниях клемм.

Сравнение результатов расчета с результатами натурных усталостных испытаний клемм. В процессе проведения лабораторных испытаний 20 пар упругих клемм ЦП 369.102 на усталость установлено, что в 95 % случаев усталостный излом клеммы происходит в представленном на рис. 6 месте перехода от участка опирания на упор на боковую арку клеммы (вид усталостного излома № 1). На усталостный излом, представленный на рис. 7, также место перехода, приходятся остальные 5 % случаев (вид усталостного излома № 2).

Разрушения упругих клемм наблюдались в диапазоне от 160 до 440 тыс. циклов. Весьма близкие результаты приведены в работе [28] для клеммы FC1503 (Pandrol UK Ltd). На рис. 6 и рис. 7 приведены места зарождения усталостных трещин для видов изломов № 1 и № 2 соответственно.

Для определения координат мест зарождений усталостных трещин изломанные фрагменты клемм, представленные на рис. 6 и рис. 7, были отсканированы и сопоставлены с 3D-моделью клеммы, соответствующей чертежу (рис. 8 и рис. 9).

По результатам расчетов для комбинаций № 1–№ 8 можно сделать вывод, что удовлетворительное соответствие с местами зарождения усталостных трещин получено для комбинаций № 1, № 4, № 7 и № 8.

На рис. 10–13 для комбинаций № 1 и № 4 для потенциально критических мест клеммы приведены распределения эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений между шагами нагружения № 2 и № 3 с указаниями узлов с наибольшими значениями для каждой области и места зарождения усталостных трещин для усталостных изломов видов № 1 и № 2. Также стоит отметить, что для обеих комбинаций область, соответствующая виду усталостного излома № 1, является более нагруженной, чем область усталостного излома № 2 (для комбинации № 1 — на 8,6 %, для комбинации № 4 — на 7,7 %).

В силу особенностей процесса обработки результатов для комбинаций № 7 и № 8 на рис. 14–15 вместо распределений факторов повреждаемости приведены положения узлов с высокими значениями фактора повреждаемости и места зарождения усталостных трещин для видов усталостных изломов № 1 и № 2. При этом, для обеих комбинаций область, соответствующая виду усталостного излома № 1, является более нагруженной, чем область усталостного излома № 2 (для комбинации № 7 — на 1,5 %, для комбинации № 8 — на 31,1 %).

Сводные результаты для комбинаций № 1, № 4, № 7 и № 8 и мест зарождения усталостных трещин приведены на рис. 16.

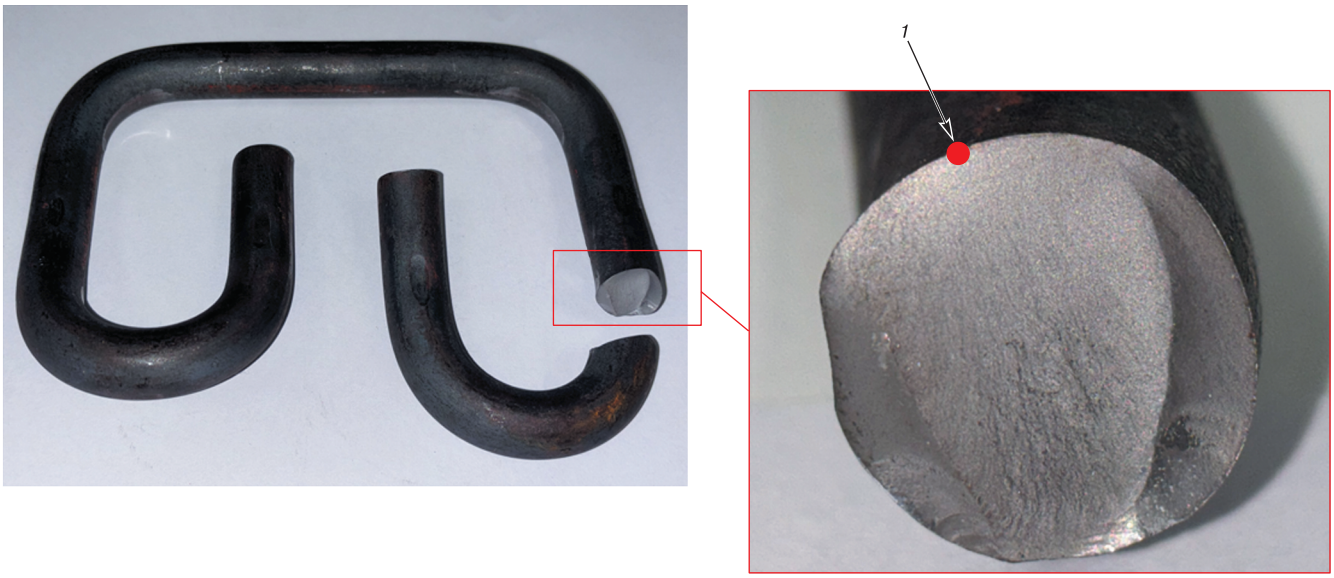

Рис. 6. Вид усталостного излома № 1 (вид на клемму снизу)*:
1 — место зарождения усталостной трещины
* Источник: фото авторов

Fig. 6. Type of fatigue fracture No. 1 (bottom view)*:
1 — fatigue crack initiation site
* Source: authors' photo

Рис. 7. Вид усталостного излома № 2 (вид на клемму сверху)*:
1 — место зарождения усталостной трещины
* Источник: фото авторов

Fig. 7. Type of fatigue fracture No. 2 (top view)*:
1 — fatigue crack initiation site
* Source: authors' photo

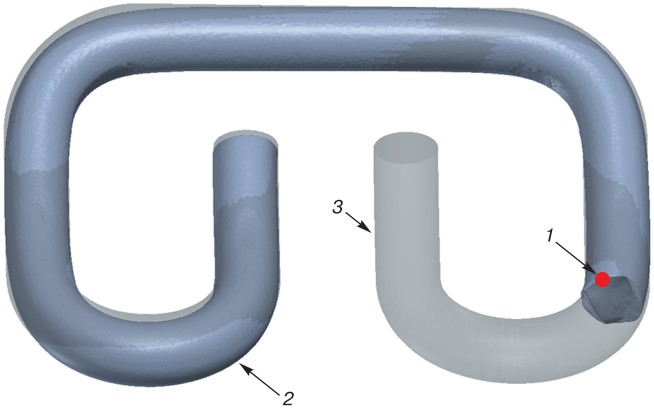

Рис. 8. Сопоставление отсканированной 3D-модели фрагмента изломанной клеммы с 3D-моделью клеммы, соответствующей чертежу, вид усталостного излома № 1 (вид на клемму снизу)*:
1 — место зарождения усталостной трещины; *2* — 3D-модель отсканированного фрагмента изломанной клеммы; *3* — 3D-модель клеммы по чертежу
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 8. Correlation between 3D scanned model of fractured clamp fragment with 3D model of the clamp corresponding to layout, fatigue fracture type No. 1 (bottom view)*:
1 — fatigue crack initiation site; *2* — 3D model of fractured clamp scanned fragment ; *3* — 3D model of the clamp based layout
* Source: compiled by the authors according to the research

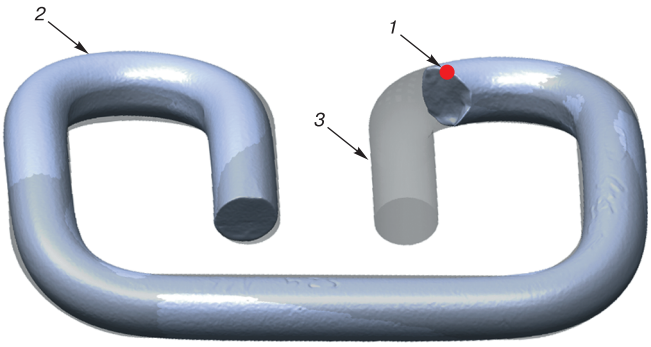

Рис. 9. Сопоставление отсканированной 3D-модели фрагмента изломанной клеммы с 3D-моделью клеммы, соответствующей чертежу, вид усталостного излома № 2 (вид на клемму сверху)*:
1 — место зарождения усталостной трещины; *2* — 3D-модель отсканированного фрагмента изломанной клеммы; *3* — 3D-модель клеммы по чертежу
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 9. Correlation between 3D scanned model of fractured clamp fragment with 3D model of the clamp corresponding to layout, fatigue fracture type No. 2 (top view)*:
1 — fatigue crack initiation site; *2* — 3D model of the scanned fragment of a fractured clamp; *3* — 3D model of the clamp based on layout
* Source: compiled by the authors according to the research

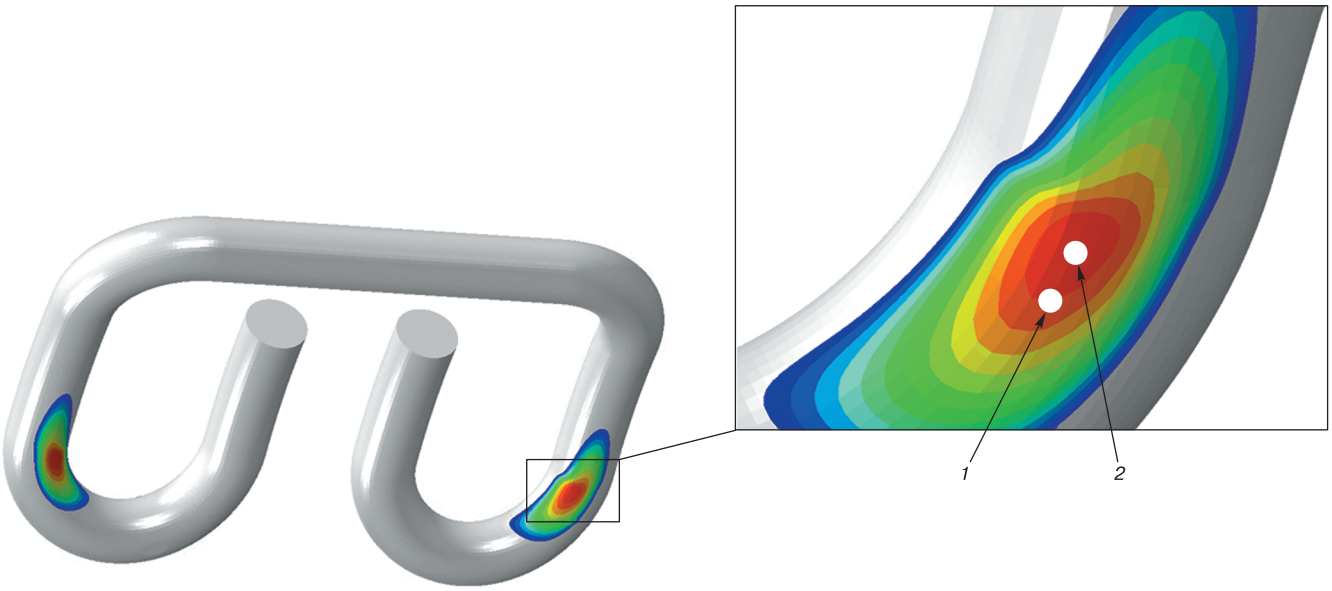

Рис. 10. Комбинация № 1, вид снизу (распределение эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений цикла)*:
1 — место зарождения усталостной трещины (вид усталостного излома № 1); *2* — расчетное потенциально критическое место, соответствующее наибольшему значению эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений для выделенной области клеммы
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 10. Combination No. 1, bottom view (distribution of equivalent cycle stress amplitude)*:
1 — location of fatigue crack initiation (fatigue fracture type No. 1); *2* — calculated potentially critical location corresponding to the maximum equivalent stress amplitude for a fully reversed cycle in the selected clamp area
* Source: compiled by the authors according to the research

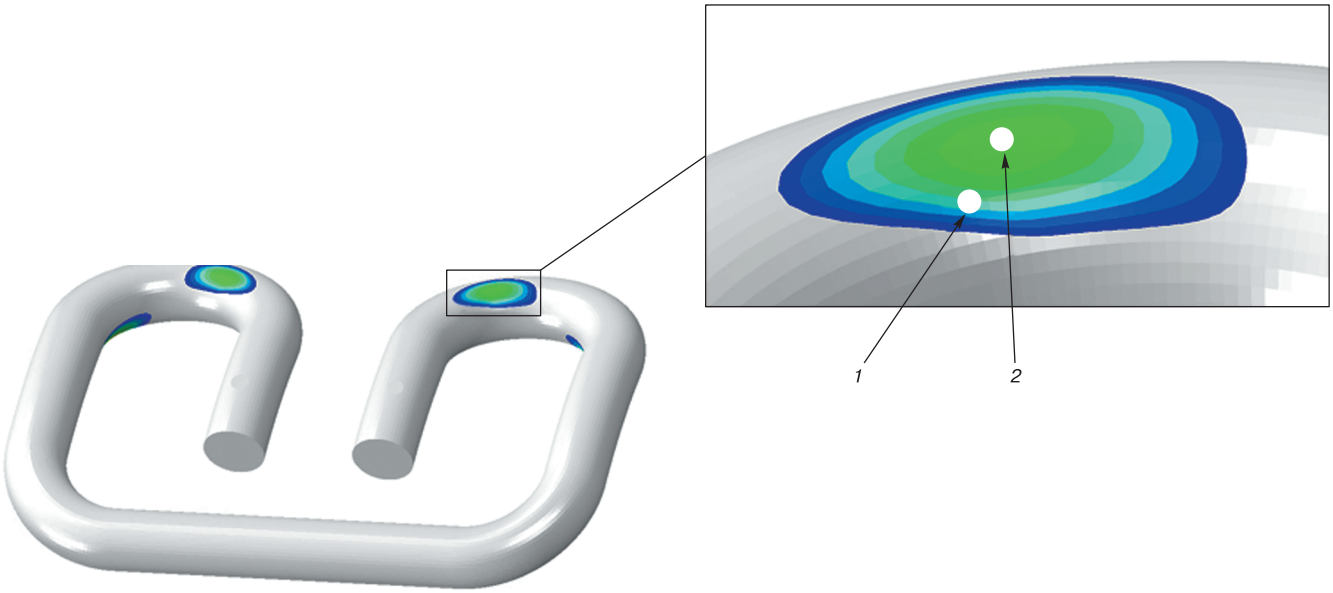

Рис. 11. Комбинация № 1, вид сверху (распределение эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений цикла)*:
1 — место зарождения усталостной трещины (вид усталостного излома № 2); *2* — расчетное потенциально критическое место, соответствующее наибольшему значению эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений для выделенной области клеммы
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 11. Combination No. 1, top view (distribution of equivalent cycle stress amplitude)*:
1 — location of fatigue crack initiation (fatigue fracture type No. 2); *2* — calculated potentially critical location corresponding to the maximum equivalent stress amplitude for a fully reversed cycle in the selected clamp area
* Source: compiled by the authors according to the research

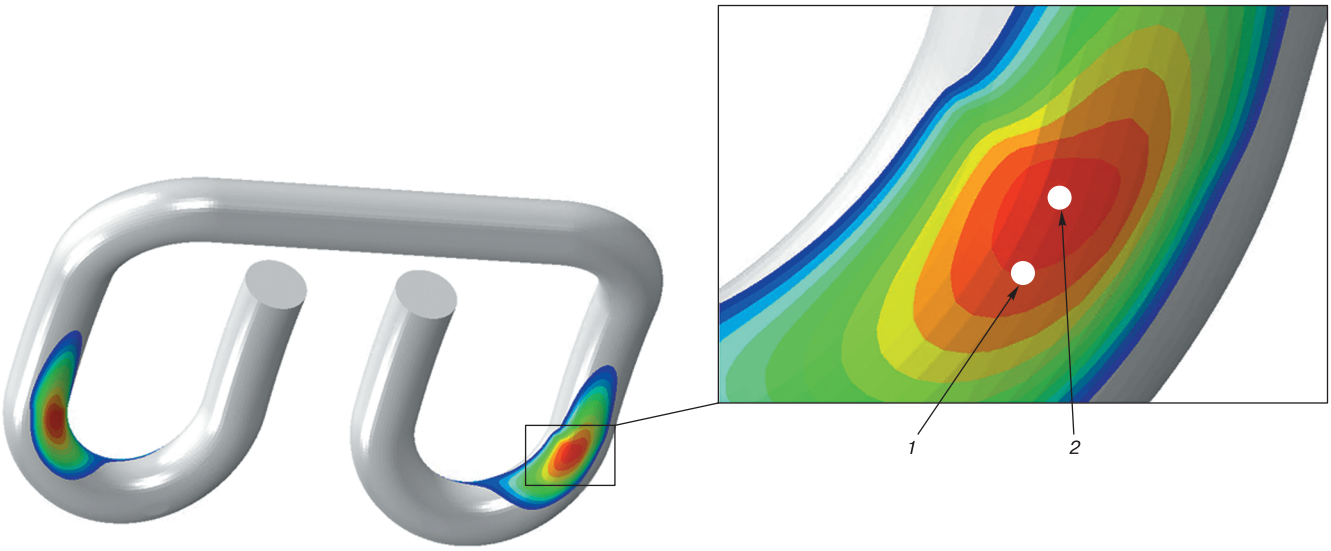

Рис. 12. Комбинация № 4, вид снизу (распределение эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений цикла)*:
1 — место зарождения усталостной трещины (вид усталостного излома № 1); *2* — расчетное потенциально критическое место, соответствующее наибольшему значению эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений для выделенной области клеммы
*Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 12. Combination No. 4, bottom view (distribution of equivalent cycle stress amplitude)*:
1 — location of fatigue crack initiation (fatigue fracture type No. 1); *2* — calculated potentially critical location corresponding to the maximum equivalent stress amplitude for a fully reversed cycle in the selected clamp area
* Source: compiled by the authors according to the research

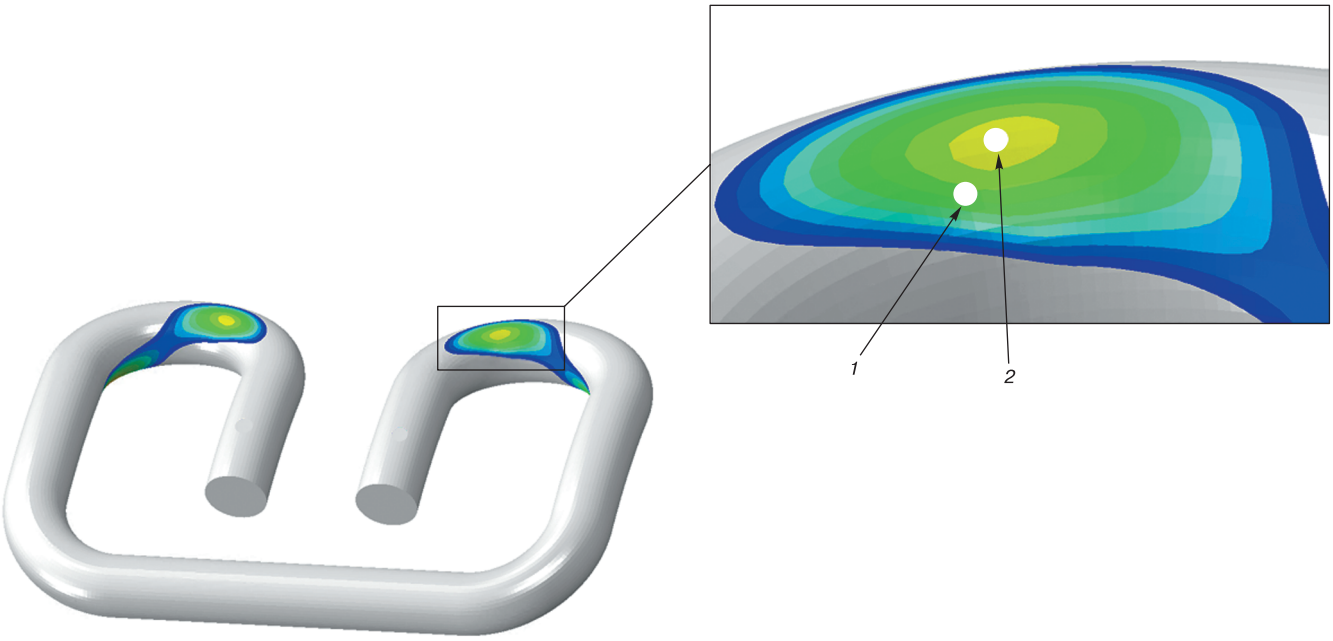

Рис. 13. Комбинация № 4, вид сверху (распределение эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений цикла)*:
1 — место зарождения усталостной трещины (вид усталостного излома № 2); *2* — расчетное потенциально критическое место, соответствующее наибольшему значению эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений для выделенной области клеммы
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 13. Combination No. 4, top view (distribution of equivalent cycle stress amplitude)*:
1 — location of fatigue crack initiation (fatigue fracture type No. 2); *2* — calculated potentially critical location corresponding to the maximum equivalent stress amplitude for a fully reversed cycle in the selected clamp area
* Source: compiled by the authors according to the research

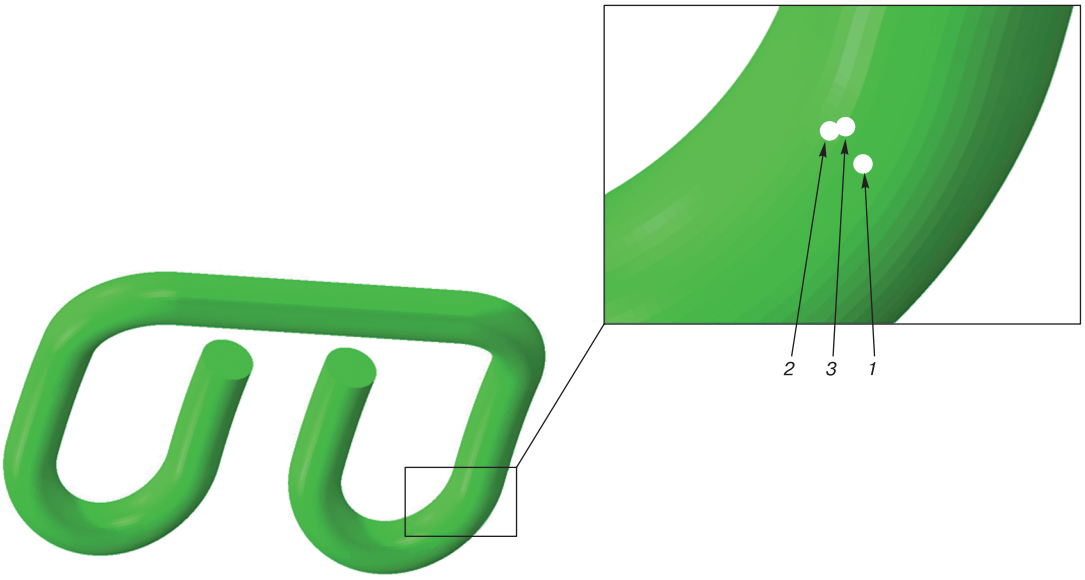

Рис. 14. Комбинации № 7 и № 8, вид снизу (положение узлов с наибольшим значением фактора повреждаемости для первой области)*:
1 — место зарождения усталостной трещины (вид усталостного излома № 1); *2* — узел с наибольшим значением фактора повреждаемости по критерию Брауна–Миллера для выделенной области клеммы; *3* — узел с наибольшим значением фактора повреждаемости по критерию Фатеми–Соси для выделенной области клеммы
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 14. Combinations No. 7 and No. 8, bottom view (location of the node with the highest damage factor value for the first area)*:
1 — location of fatigue crack initiation (fatigue fracture type No. 1); *2* — node with the maximum Brown–Miller damage parameter in the selected clamp area; *3* — node with the maximum Fatemi–Socie damage parameter in the selected clamp area
* Source: compiled by the authors according to the research

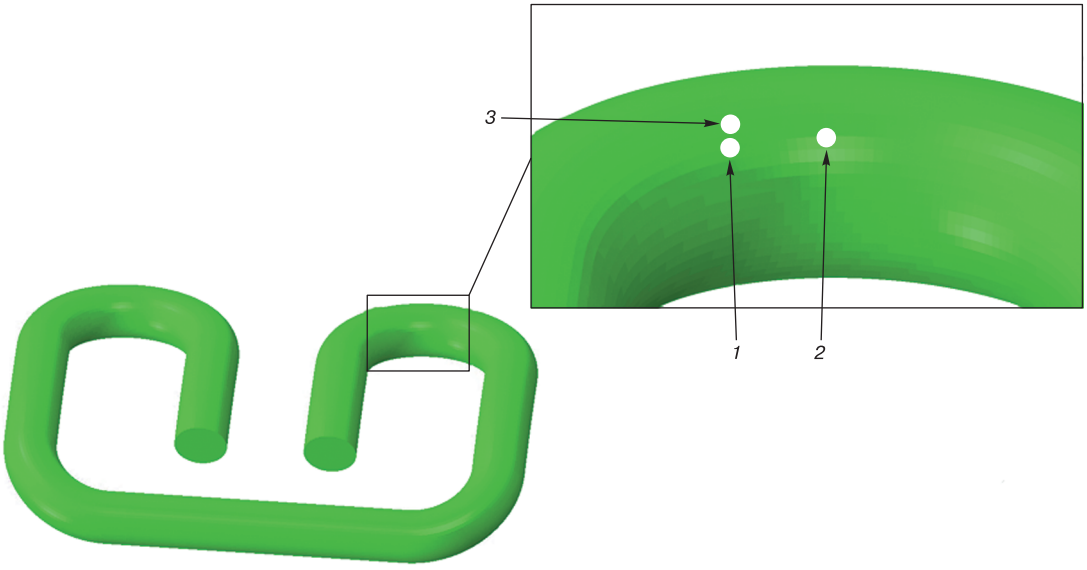

Рис. 15. Комбинации № 7 и № 8, вид сверху (положение узла с наибольшим значением фактора повреждаемости для второй области)*:
1 — место зарождения усталостной трещины (вид усталостного излома № 2); *2* — узел с наибольшим значением фактора повреждаемости по критерию Брауна–Миллера для выделенной области клеммы; *3* — узел с наибольшим значением фактора повреждаемости по критерию Фатеми–Соси для выделенной области клеммы
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 15. Combinations No. 7 and No. 8, top view (location of the node with the highest damage factor value for the second area)*:
1 — location of fatigue crack initiation (fatigue fracture type No. 2); *2* — node with the maximum Brown–Miller damage parameter in the selected clamp area; *3* — node with the maximum Fatemi–Socie damage parameter in the selected clamp area
* Source: compiled by the authors according to the research

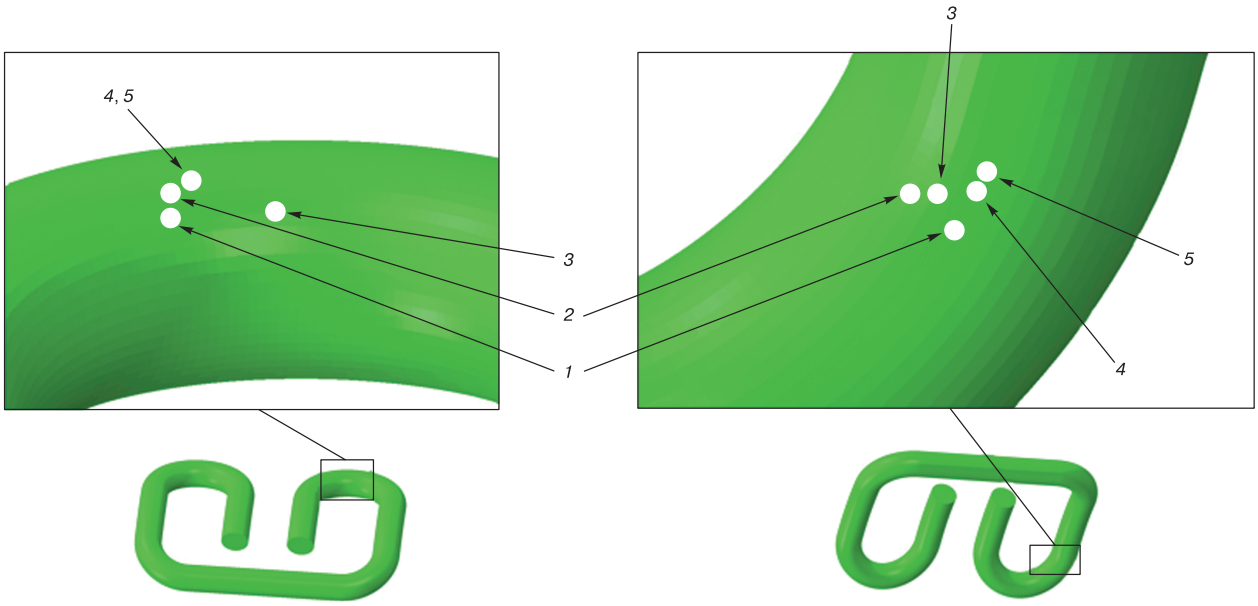

Рис. 16. Сводные результаты для комбинаций № 1, № 4, № 7 и № 8 (виды усталостных изломов № 1 и № 2)*:
1 — место зарождения усталостной трещины; *2* — узел с наибольшим значением фактора повреждаемости по критерию Брауна–Миллера для выделенной области клеммы; *3* — узел с наибольшим значением фактора повреждаемости по критерию Фатеми–Соси для выделенной области клеммы; *4* — расчетное потенциально критическое место, соответствующее наибольшему значению эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений для выделенной области клеммы для комбинации № 1; *5* — расчетное потенциально критическое место, соответствующее наибольшему значению эквивалентной симметричному циклу амплитуды напряжений для выделенной области клеммы для комбинации № 4
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 16. Summary results for combinations No. 1, No. 4, No. 7, and No. 8 (fatigue fracture types No. 1 and No. 2)*:
1 — location of fatigue crack initiation; *2* — node with the maximum Brown–Miller damage parameter in the selected clamp area; *3* — node with the maximum Fatemi–Socie damage parameter in the selected clamp area; *4* — calculated potentially critical location corresponding to the maximum equivalent stress amplitude for a fully reversed cycle in the selected clamp area for combination No. 1; *5* — calculated potentially critical location corresponding to the maximum equivalent stress amplitude for a fully reversed cycle in the selected clamp area for combination No. 4
* Source: compiled by the authors according to the research

Обсуждение. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что при оценке усталостных характеристик упругих клемм из стали 60С2А (или аналогов) хорошие результаты показывают комбинации № 1 (метод максимальных главных напряжений с методом учета влияния среднего напряжения цикла SWT), № 4 (метод максимальных главных напряжений с методом учета влияния среднего напряжения цикла уравнения схематизированной диаграммы предельных амплитуд напряжений при ассиметричных циклах), № 7 (метод критической плоскости (критерий Брауна–Миллера) с методом учета влияния среднего напряжения цикла, представленной в работе [26]) и № 8 (метод критической плоскости (критерий Фатеми–Соси, учитывающий влияние среднего напряжения цикла).

Также в пользу метода максимальных главных напряжений можно привести информацию, представленную в работе[8], согласно которой излом в плоскости максимальных нормальных напряжений происходит при высоких средних напряжениях асимметричного цикла. Эта особенность характерна для условий эксплуатации упругих клемм, затяжка которых в конструкции узла скрепления обуславливает высокое значение среднего напряжения цикла.

Результаты исследования могут быть учтены:

- при проектировании новых упругих клемм узлов промежуточных рельсовых скреплений в части оценки достоверности результатов расчетного обоснования прочности;
- разработке экспериментальных методик, позволяющих сформулировать требования к изделию, направленных на повышение его эксплуатационной надежности;
- дальнейших научных изысканиях.

Особый интерес представляет разработка модели для упругой клеммы, позволяющей с достаточной степенью точности оценивать количество циклов нагружения клеммы до возникновения в ней усталостной трещины (оценка усталостной долговечности

[8] Одинг И. А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. М.: Машгиз, 1962. 260 с.

изделия). В связи с этим, авторами запланировано проведение дополнительного исследования, направленного на разработку указанной модели.

Результаты работы применимы к клеммам из стали 60С2А или ее аналогов.

Заключение. В результате проведения исследования выполнен обзор и анализ методов учета сложного НДС и методов учета влияния среднего напряжения цикла для расчетов усталостных характеристик упругих клемм, разработана КЭМ упругой клеммы, проведено моделирование НДС клеммы на ключевых этапах ее циклического нагружения, подготовлены и проведены натурные испытания упругих клемм на усталость, произведено сравнение результатов виртуального эксперимента для различных комбинаций методов учета сложного НДС с методами учета влияния среднего напряжения цикла и натурных усталостных испытаний упругих клемм в части локализации потенциально критических мест.

Лучшее соответствие результатов расчета потенциально критических мест с местами зарождения усталостных трещин, полученных в результате натурных испытаний клемм на усталость, показали следующие комбинации методов учета сложного НДС и методов учета влияния среднего напряжения цикла:

- метод максимальных главных напряжений с методом учета влияния среднего напряжения цикла SWT;
- метод максимальных главных напряжений с методом учета влияния среднего напряжения цикла уравнения схематизированной диаграммы предельных амплитуд напряжений при асимметричных циклах;
- метод критической плоскости (критерий Брауна–Миллера) с методом учета влияния среднего напряжения цикла;
- метод критической плоскости (критерий Фатеми–Сои, учитывающий влияние среднего напряжения цикла).

Благодарности: коллектив авторов исследования выражает благодарность генеральному директору компании ООО «Сфера Альянс» Александру Владимировичу Попову за технологическую поддержку проведения исследования.

Acknowledgements: the team of authors expresses gratitude to the General Director of LLC "Sphere Alliance" Alexander V. Popov for the technological support of the study.

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.

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. Park Y.-C., An C., 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(5):1570–1577. https://doi.org/10.1007/s13296-019-00231-5. EDN: https://elibrary.ru/oiozcc.

2. 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):1–12. https://doi.org/10.1177/1687814018767249.

3. Kim S.-H., Fang X.-J., Park Y.-C., 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.

4. Cho J.-G., Kim J.-W., Koo J.-S. A study on fatigue strength improvement for tension clamp of railway using work hardening. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019;491:012028. https://doi.org/10.1088/1757-899X/491/1/012028.

5 Wang Y.-X., Xiao W.-J., Wang Z.-F., Liu Y., Wang E.-B., Chang H.-T. Fracture behavior analysis and fatigue assessment of the spring clip in heavy-haul railway. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2024;47(10):3658–3672. https://doi.org/10.1111/ffe.14401. EDN: https://elibrary.ru/xcqxop.

6. Liu Y., Jiang X., Li Q., Liu H. Failure analysis and fatigue life prediction of high-speed rail clips based on DIC technique. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021;13(12):1–13. https://doi.org/10.1177/16878140211066225. EDN: https://elibrary.ru/hykfco.

7. Liu Y., Li Q., Jiang X., Liu H., Yuan X., Zhu Z. The effect of material static mechanical properties on the fatigue crack initiation life of rail fastening clips. *Advances in Civil Engineering*. 2021;2021(1):1366007. https://doi.org/10.1155/2021/1366007. EDN: https://elibrary.ru/tmxhjs.

8. Ferreño D., Casado J.A., Carrascal I.A., Diego S., Ruiz E., Saiz M., Sainz-Aja J.A., Cimentada A.I. Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the SKL-1 railway fastening system. *Engineering Structures*. 2019;188:553–563. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.053.

9. Liu Z., Tsang K.S., Liu Y., Pang J.H.L. Finite element and experimental study on multiaxial fatigue analysis of rail clip failures. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2020;43(10):2390–2401. https://doi.org/10.1111/ffe.13310. EDN: https://elibrary.ru/fnemrs.

10. Xie M., Wei K., Liu Y., Li J., Zhao Z., Wang P. Fatigue life prediction and verification of railway fastener clip based on critical plane method. *International Journal of Applied Mechanics*. 2024;16(05):2450053. https://doi.org/10.1142/s1758825124500534. EDN: https://elibrary.ru/beereu.

11. Papuga J., Vízková I., Lutovinov M., Nesládek M. Mean stress effect in stress-life fatigue prediction re-evaluated. *MATEC Web of Conferences*. 2018;165:10018. https://doi.org/10.1051/matecconf/201816510018.

12. Стрижиус В.Е. Методы расчета на усталость элементов авиационных конструкций при многоосном нагружении // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 187. С. 65–73. EDN: https://www.elibrary.ru/pxqkhn.

Strizhius V.E. Methods for fatigue life analysis of aircraft structural elements under multi-axis loading. *Civil Aviation High Technologies*. 2013;187:65–73. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/pxqkhn.

13. Findley W.N. A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending. *Journal of Engineering for Industry*. 1959;81(4):301–305. https://doi.org/10.1115/1.4008327.

14. Brown M.W., Miller K.J. A theory for fatigue failure under multiaxial stress-strain conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1973;187(1):745–755. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1973_187_161_02.

15. Fatemi A., Socie D. F. A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1988; 11(3):149–165. https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1988.tb01169.x.

16. Kim J.-H., Park Y.-C., Kim M., Sim H.-B. A fatigue reliability assessment for rail tension clamps based on field measurement data.

Applied Sciences. 2022;12(2):624. https://doi.org/10.3390/app12020624. EDN: https://elibrary.ru/dltxjo.

17. Glinka G., Wang G., Plumtree A. Mean stress effects in multiaxial fatigue. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1995;18(7–8):755–764. https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1995.tb00901.x.

18. Ali R., Shehbaz T., Felicis D. D., Sebastiani M., Bemporad E. Investigations into fatigue failure in e-type fastening clips used in railway tracks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2020;235(7):898–905. https://doi.org/10.1177/0954409720967802. EDN: https://elibrary.ru/beddby.

19. Hasap A., Noraphaiphipaksa N., Kanchanomai C. Influence of malposition on the performance of elastic rail clip: Toe load, stress, and friction. *Structures*. 2020;28:2661–2670. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.073. EDN: https://elibrary.ru/buusua.

20. Xiao H., Wang J.-B., Zhang Y.-R. The fractures of e-type fastening clips used in the subway: Theory and experiment. *Engineering Failure Analysis*. 2017;81:57–68. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.07.006.

21. Ballard P., Dang Van K., Deperrois A., Papadopoulos Y. V. High cycle fatigue and a finite element analysis. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1995;18(3):397–411. https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1995.tb00886.x.

22. McDiarmid D. L. A general criterion for high cycle multiaxial fatigue failure. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 1991;14(4):429–453. https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1991.tb00673.x.

23. Бураго Н. Г., Журавлев А. Б., Никитин И. С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2011. № 6. С. 22–23. EDN: https://www.elibrary.ru/oncsyn.

Bourago N. G., Zhuravlev A. B., Nikitin I. S. Models of multiaxial fatigue fracture and service life estimation of structural elements. *Mechanics of Solids: A Journal of Russian Academy of Sciences*. 2011;(6):22–23. (In Russ.). EDN: https://www.elibrary.ru/pepwlh.

24. Yu Z.-Y., Zhu S.-P., Liu Q., Liu Y. A new energy-critical plane damage parameter for multiaxial fatigue life prediction of turbine blades. *Materials*. 2017;10(5):513. https://doi.org/10.3390/ma10050513.

25. 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/qyogfn.

Berezin V. O., Zamukhovsky 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/qyogfn.

26. Chu C.-C., Conle F. A., Bonnen J. Multiaxial stress-strain modeling and fatigue life prediction of SAE axle shafts. *Advances in Multiaxial Fatigue, ASTM STP 1191. American Society for Testing and Materials*. 1993;1191:37–54. https://doi.org/10.1520/STP1191-EB.

27. Dowling N. E., Calhoun C. A., Arcari A. Mean stress effects in stress-life fatigue and the Walker equation. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2009;32(3):163–179. https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2008.01322.x.

28. Tamagawa S., Kataoka H., Deshimaru T. A Fatigue Limit Diagram For Plastic Rail Clips. *Computers in Railways XIV*. 2014;135:839–848. https://doi.org/10.2495/CR140701.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вадим Олегович БЕРЕЗИН,
аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство»,
Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ),
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9),
Author ID: 1303821, https://orcid.org/0009-0008-1831-6093

Александр Владимирович ЗАМУХОВСКИЙ,
канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ),
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9),
Author ID: 825248, https://orcid.org/0000-0001-5900-7942

Андрей Александрович ЕФИМОВ,
ведущий эксперт, группа моделирования и расчетов,
Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта
(ИЦ ЖТ, 121205, г. Москва, инновационный центр Сколково,
Большой б-р., д. 40), https://orcid.org/0009-0004-7722-7032

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim O. BEREZIN,
Postgraduate Student, Track and track facilities Department,
Russian University of Transport (127994, Moscow,
bldg. 9, 9, Obraztsova St.), Author ID: 1303821,
https://orcid.org/0009-0008-1831-6093

Alexander V. ZAMUKHOVSKY,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Track and track facilities Department, Russian University of Transport
(127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obraztsova St.), Author ID: 825248,
https://orcid.org/0000-0001-5900-7942

Andrey A. EFIMOV,
Leading Expert, Modeling and Calculation Group,
JSC «Engineering Center of Railway Transport»
(121205, Moscow, Skolkovo Innovation Centre, 40, Bolshoi Blvd.),
https://orcid.org/0009-0004-7722-7032

ВКЛАД АВТОРОВ

Вадим Олегович БЕРЕЗИН. Постановка целей и задач исследования, поиск научных источников, проведение натурных усталостных испытаний, проведение расчетов, анализ результатов, написание текста статьи (70 %).

Александр Владимирович ЗАМУХОВСКИЙ. Постановка целей и задач исследования, общее руководство исследованием, редактирование текста статьи (15 %).

Андрей Александрович ЕФИМОВ. Постановка целей и задач исследования, консультирование при проведении расчетов, анализ результатов, написание текста статьи, редактирование текста статьи (15 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vadim O. BEREZIN. Setting research goals and objectives, search for references, conducting field fatigue experiments, carrying out calculations, results analysis, article writing (70 %).

Alexander V. ZAMUKHOVSKY. Setting research goals and objectives, general management of the research, conducting field experiments, article editing (15 %).

Andrey A. EFIMOV. Setting research goals and objectives, consulting on calculations, results analysis, article writing and editing (15 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 04.08.2025, рецензия от первого рецензента получена 14.08.2025, рецензия от второго рецензента получена 18.08.2025, принята к публикации 09.09.2025.

The article was submitted 04.08.2025, first review received 14.08.2025, second review received 18.08.2025, accepted for publication 09.09.2025.