

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 625.143.51

EDN: <https://elibrary.ru/qyogfn>

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



Валидация конечно-элементной модели клеммы узла промежуточного рельсового скрепления

В. О. Березин¹✉, А. В. Замуховский¹, А. А. Ефимов², А. В. Гречаник¹

¹Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)),
Москва, Российская Федерация

²Инжиниринговый центр железнодорожного транспорта (АО «ИЦ ЖТ»),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен вопрос валидации и верификации конечно-элементной модели упругой клеммы узла промежуточного рельсового скрепления. Проведение валидации и верификации производится с целью получения модели клеммы, позволяющей с достаточной степенью точности проводить оценку напряженно-деформированного состояния клеммы для заданных случаев нагружения. Достоверные результаты расчетов существенно сокращают вероятность несоответствия показателей жесткости и прочности проектным характеристикам.

Материалы и методы. В качестве исследуемой клеммы была выбрана упругая клемма ЦП 369.102. Разработка ее конечно-элементной модели проведена с учетом реальной геометрии изделия, полученной с помощью 3D-сканирования, и упруго-пластической модели материала. При проведении верификации конечно-элементной модели проведен анализ сеточной сходимости, анализ качества конечных элементов и сравнение с результатами аналитического расчета. Валидация проводилась путем сравнения результатов натурного и виртуального экспериментов по двум параметрам: жесткость клеммы в зоне давления на концевые участки и напряжения на боковых участках клеммы. В качестве метода измерения напряжений для натурного эксперимента выбран метод тензометрии.

Результаты. Полученные результаты показали приемлемую сходимость между натурным и виртуальным экспериментами для параметра жесткости клеммы в зоне давления на концевые участки, и погрешность между натурным и виртуальным экспериментом составила 4 %, для напряжения на боковых участках клеммы — от 8,3 до 15,4 %. Данные показатели свидетельствуют о достаточной точности разработанной модели.

Обсуждение и заключение. Предложены и обсуждены возможные причины расхождения результатов по параметру напряжения. Запланированы дальнейшие исследования для повышения точности разработанной конечно-элементной модели, направленные на оценку чувствительности тензорезисторов к поперечным и касательным деформациям. Валидация конечно-элементной модели подтвердила ее пригодность для использования в инженерных расчетах при проектировании клемм, разработке на ее основании методик испытаний клемм и других научных изысканиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рельсовое скрепление, упругая клемма, тензорезистор, напряжения, верификация модели, валидация

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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.



TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article

UDK 625.143.51

EDN: <https://elibrary.ru/qyogfn>

Scientific specialty: 2.9.2 Railway track, survey and design of railways



Validation of finite-element model of clamp of rail fastening system

Vadim O. Berezin¹✉, Alexander V. Zamukhovsky¹,
Andrey A. Efimov², Alexander V. Grechanik¹

¹Russian University of Transport,
Moscow, Russian Federation

²Engineering Centre of Railway Transport,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper discusses the validation and verification process of the finite element model (FEM) of the elastic clamp of the rail fastening system. Validation and verification are conducted to obtain clamp model that allows to sufficiently evaluate the stress-strain state of clamp condition for specified loading cases. Reliable calculation results significantly reduce the possibility of mismatch of stiffness and strength indicators with design characteristics.

Materials and methods. The elastic clamp CP 369.102 is chosen as the clamp under study. The development of its FEM is carried out considering real geometry of the product obtained by 3D scanning and the elastic-plastic model of the material. The verification of the FEM is conducted by analysing the mesh convergence, the quality of finite elements and by comparing with the results of analytical calculation. Validation involves comparison of natural and virtual experiment results for two parameters: the stiffness of the clamp in the pressure zone on the end sections and the stresses on the lateral sections of the clamp. The strain gauge method was chosen as the method for measuring stresses for the natural experiment.

Results. The obtained results showed acceptable convergence between the natural and virtual experiments for two parameters: the stiffness of the clamp in the pressure zone on the end sections and the stresses on the lateral sections of the clamp. For the first parameter, the deviation between natural and virtual experiments is 4 %, for the second — from 8.3 to 15.4 %. These indicators testify to the sufficient accuracy of the developed model.

Discussion and conclusion. Possible reasons for the discrepancy of the results for the stress parameter are proposed and discussed. Further studies are planned to improve the accuracy of the developed FEM, aimed at evaluating the sensitivity of strain gauges to transverse and tangential deformations. Validation of the FEM confirmed its suitability for use in engineering calculations for clamp design, development of clamp test methods based on it, and other scientific research.

KEYWORDS: rail fastening, elastic clamp, strain gauge, stress, verification, validation

FOR CITATION: 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.).

Введение. Одним из этапов проектирования упругих клемм является их расчет на жесткость и прочность, который может проводиться с помощью программного комплекса, реализующего метод конечных элементов (далее — МКЭ). Возможность получения достоверных результатов расчета обеспечивается, в том числе, верификацией и валидацией конечно-элементной модели (далее — КЭМ). Достоверные результаты расчетов существенно сокращают риски несоответствия характеристик реального изделия проектным характеристикам.

Примеры верификации КЭМ упругих клемм описаны в работах [1–7, 9].

Одним из примеров валидации КЭМ является работа [7], в которой измеренные деформации сравниваются с соответствующими рассчитанными в КЭМ значениями. В работах [5–6] применяется аналогичный подход к валидации конечно-элементной модели упругой клеммы.

Другим примером валидации КЭМ по деформациям является метод корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation — DIC) [8], позволяющий получать распределение поля деформаций на поверхности нагруженного объекта исследования. В [9] авторы применили данный метод для получения поля деформаций при нагружении клеммы. Еще один пример валидации упругой клеммы приведен в работе [1]. В данном случае соотнесение результатов натурального и виртуального экспериментов проводилось по параметру жесткости клеммы в зоне давления на нарельсовые участки.

В настоящей работе предложен подход к верификации и валидации КЭМ упругой клеммы, который позволяет получать достоверные результаты расчета ее упруго-прочностных характеристик. Новый подход является обобщением подходов, представленных в работах [1–7, 9] с применением дополнительных методов верификации: анализа качества сетки и подтверждения корректности выбора типа и размера конечного элемента посредством сравнения с результатами аналитического расчета.

Подход к валидации, предлагаемый авторами, в отличие от используемых в работах [1, 5, 6, 7, 9] направлен на подтверждение сходимости результатов натурального и виртуального экспериментов сразу по двум ключевым для клеммы параметрам: действующим напряжениям и жесткости. Он состоит в последовательном решении следующих задач:

- выбор параметров сравнения результатов моделирования и натурального эксперимента;
- подготовка и проведение натурального эксперимента;
- разработка КЭМ упругой клеммы, проведение ее верификации;

- проведение моделирования натурального эксперимента (виртуальный эксперимент);
- сравнение результатов натурального и виртуального экспериментов.

Выбор объекта исследования и параметров сравнения.

В качестве объекта исследования выбрана серийно используемая на сети железных дорог Российской Федерации упругая клемма ЦП 369.102. Для сравнения выбраны параметры жесткости клеммы при приложении сосредоточенных сил на ее концевые участки и напряжения на боковых участках клеммы (пересчитываются из измеренных значений выходных сигналов, полученных при проведении тензометрии). Метод тензометрии выбран как наиболее распространенный и достаточно точный для выполнения поставленной задачи.

Методика испытаний. Натурное испытание состоит в имитации статического нагружения клеммы в процессе ее затяжки в составе узла рельсового скрепления и рельса. На рис. 1 представлена соответствующая схема нагружения.

Основное допущение методики заключается в том, что участок опорной плиты, с которым контактирует нарельсовая часть клеммы, выполнен без наклона, имеющего место в реальной конструкции подошвы рельса.

Клемму устанавливают на опорную плиту испытательной машины и осуществляют трехкратное нагружение перед контрольным нагружением для проверки остаточных деформаций. Фото клеммы на испытательной машине представлено на рис. 2.

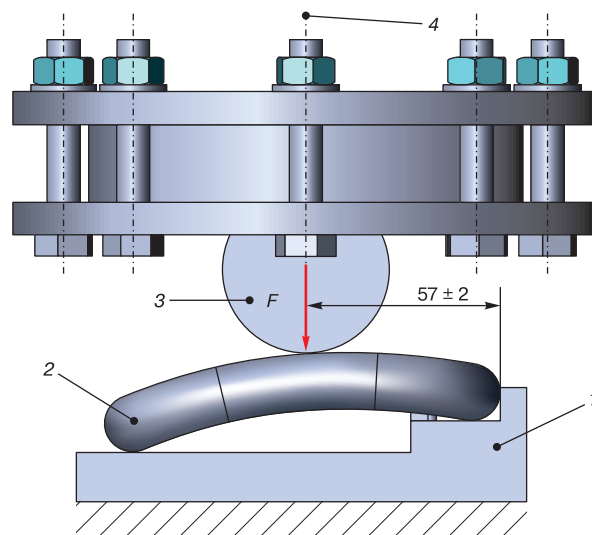


Рис. 1. Схема приложения нагрузки*:

1 — опорная плита; 2 — клемма; 3 — нагружающее приспособление; 4 — ось штока испытательной машины; F — статическая нагрузка

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig 1. Load application scheme*:

1 — base plate; 2 — clamp; 3 — loading device; 4 — testing machine rod axis; F — static load

* Source: compiled by the authors according to research materials

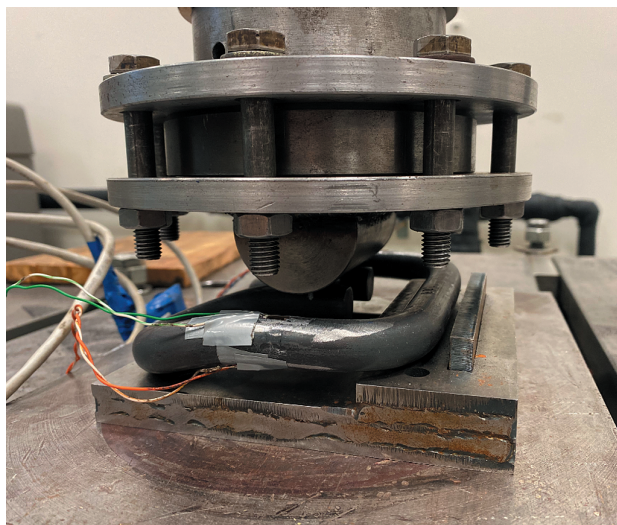


Рис. 2. Фото клеммы на испытательной машине*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 2. Photo of clamp on test machine*

* Source: compiled by the authors according to research materials

Нагружение концевых участков клеммы осуществляют через нагружающее приспособление. Нагружение клеммы производят, контролируя усилие на штоке испытательной машины, до достижения усилия, 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 к усилию монтажного прижатия рельса к шпале от двух клемм не менее 25 кН.

В эксперименте осуществляется запись усилия на штоке и перемещения штока вдоль его оси встроенными в испытательную машину датчиками. Кроме того, для экспериментального определения напряжений были использованы тензорезисторы ТКБО-5-120(12) с базой 5 мм (рис. 3). Схема наклейки представлена на рис. 4.

Положения тензорезисторов определяли на основе данных предварительного виртуального эксперимента нагружения КЭМ клеммы с учетом рекомендаций¹. При выборе мест наклейки учитывали требование к отсутствию пластических деформаций и высокому градиенту напряжений в данных областях.

На рис. 4 приведена схема наклейки тензорезисторов. Парное расположение датчиков в двух сечениях — на выпуклой части (сверху) и на вогнутой части (снизу) на боковых участках клеммы связано с необходимостью получения достаточной информации о распределении напряжений в каждом из рассмотренных сечений клеммы.



Рис. 3. Фото клеммы с наклеенными тензорезисторами (вид сверху)*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 3. Photo of clamp with glued strain gauges (top view)*

* Source: compiled by the authors according to research materials

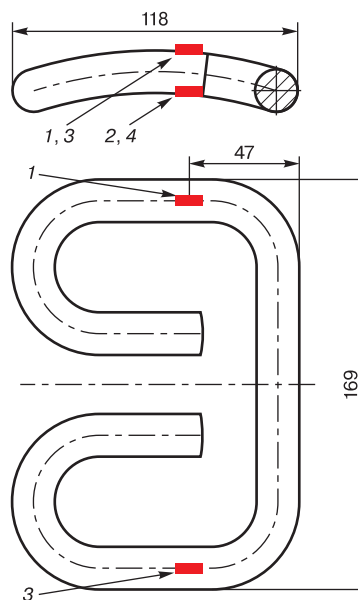


Рис. 4. Расположение тензорезисторов на клемме*:

1, 3 — тензорезисторы сверху клеммы; 2, 4 — тензорезисторы снизу клеммы

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 4. Location of strain gauges on the clamp*:

1, 3 — strain gauges on top of the clamp; 2, 4 — strain gauges on bottom of the clamp

* Source: compiled by the authors according to research materials

При проведении эксперимента для каждого тензорезистора осуществляется запись величины выходного сигнала, пропорционального деформации клеммы.

¹ Тензометрия в машиностроении. Справ. пособие / Р. А. Макаров, А. Б. Ренский, Г. Х. Боркунский, М. И. Этингоф; под ред. Р. А. Макарова. М.: Машиностроение, 1975. 287 с.

Для перевода величины выходного сигнала в значение соответствующего напряжения используется калибровочный коэффициент. В настоящей работе калибровочный коэффициент определяли с помощью стальной балки равного сопротивления в соответствии с [10].

Разработка и верификация КЭМ. В целях учета в расчетах напряженно-деформированного состояния фактической геометрии клеммы проведено 3D-сканирование выбранного экземпляра клеммы и получена ее твердотельная модель. Результат 3D-сканирования приведен на рис. 5, на поверхностях клеммы заметны следы от инструмента.

Для построения соответствующей эксперименту сборной КЭМ использовались 3D-модели клеммы, опорной плиты и нагружающего приспособления с последующим заданием их физических свойств (рис. 6).

Разработанная КЭМ учитывает следующие виды нелинейностей: геометрическую, физическую и нелинейность, обусловленную наличием контактного взаимодействия деталей. Все контактные взаимодействия учитывают трение.

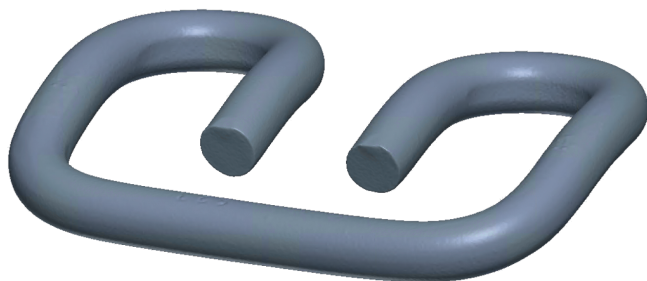


Рис. 5. Результат 3D-сканирования*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 5. Result of 3D scanning*

* Source: compiled by the authors according to research materials

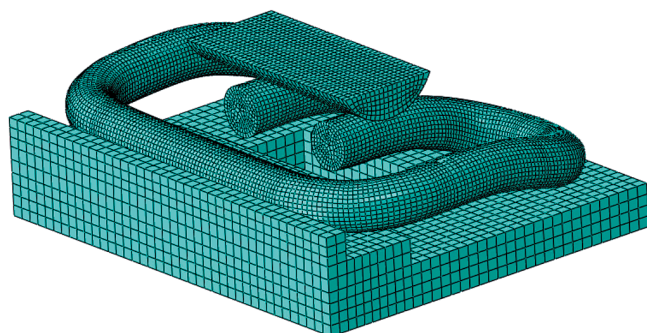


Рис. 6. Конечно-элементная модель клеммы, опорной плиты и нагружающего приспособления*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 6. Finite-element model of the clamp, base plate and loading device*

* Source: compiled by the authors according to research materials

Модели материалов клеммы (сталь 60С2А ГОСТ 14959-2016), опорной плиты и нагружающего приспособления (сталь 20 ГОСТ 1050-2013) упругопластические, изотропные. Физико-механические характеристики материалов приведены в табл. 1.

Конечно-элементные модели клеммы, опорной плиты и нагружающего приспособления построены с использованием гексагональных конечных элементов первого порядка. Для клеммы выбран тип элементов с точками интегрирования в узлах для более точного получения распределения напряжений на поверхности клеммы. Для ориентации модели в пространстве выбрана декартова система координат $X1$, $Y1$, $Z1$ (рис. 7).

В качестве граничных условий приложены закрепления согласно схеме на рис. 7. Обозначения $U1$, $U2$, $U3$ соответствуют поступательным степеням свободы вдоль осей $X1$, $Y1$, $Z1$, а $R1$, $R2$, $R3$ — вращательным степеням свободы вокруг осей $X1$, $Y1$, $Z1$ соответственно.

Таким образом, нижняя поверхность опорной плиты закреплена по трем поступательным степеням свободы $U1$, $U2$, $U3$ (граничное условие № 1), верхняя плоская поверхность нагружающего приспособления имеет связь с опорным узлом через кинематическую связь, передающую все степени свободы (кинематическая связь № 1), опорный узел закреплен по пяти степеням свободы $U1$, $U3$, $R1$, $R2$, $R3$ и имеет возможность перемещаться вдоль оси $Y1$ (граничное условие № 2). К опорному узлу в направлении $Y1$ приложено сосредоточенное усилие F величиной 25 кН.

Актуальные положения тензорезисторов в КЭМ клеммы согласно отсканированной 3D-модели отмечены на рис. 8 номерами 1–4.

Для выбора размера конечного элемента клеммы проведен анализ сеточной сходимости. Сеточная сходимость оценивалась как среднее значение напряжений в узлах, лежащих на оси первого тензорезистора в направлении измерения по оси тензорезистора. Результаты анализа приведены на рис. 9.

Таблица 1

Физико-механические характеристики материалов*

Table 1

Physical and mechanical characteristics of materials*

Параметр	Сталь 20 ГОСТ 14959-2016	Сталь 60С2А ГОСТ 1050-2013
Модуль упругости, МПа	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
Предел текучести, МПа	265	1575
Предел прочности, МПа	573	1750

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

* Source: compiled by the authors according to research materials

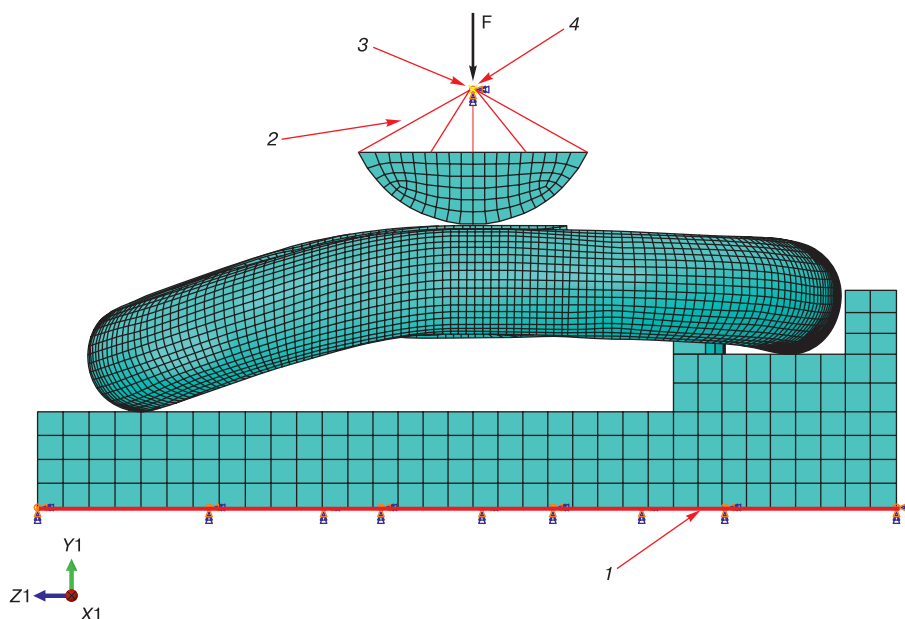


Рис. 7. Схематичное изображение граничных условий*:
 1 — граничное условие № 1; 2 — кинематическая связь № 1; 3 — граничное условие № 2; 4 — опорный узел
 * Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 7. Schematic illustration of boundary conditions*:
 1 — boundary condition No. 1; 2 — kinematic connection No. 1; 3 — boundary condition No. 2; 4 — reference node
 * Source: compiled by the authors according to research materials

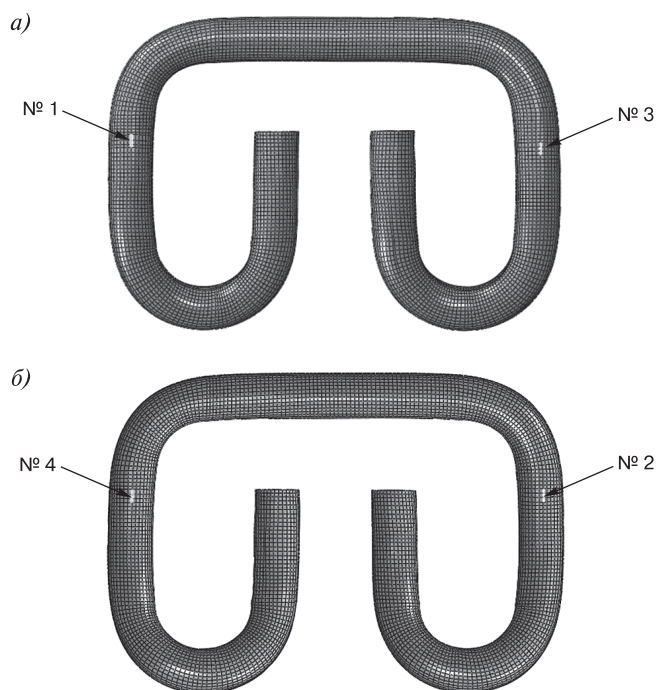


Рис. 8. Актуальные положения тензорезисторов на КЭМ клеммы*:
 а — вид сверху; б — вид снизу

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 8. Actual positions of strain gauges on the FEM of the clamp*:
 а — top view; б — bottom view

* Source: compiled by the authors according to research materials

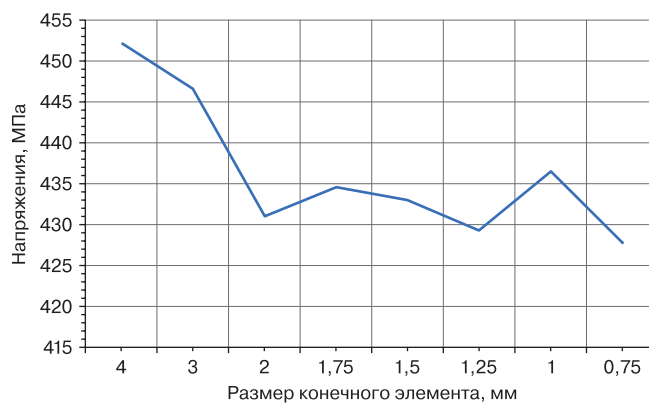


Рис. 9. График сеточной сходимости*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 9. Mesh convergence graph*

* Source: compiled by the authors according to research materials

Из результатов на рис. 9 видно, что сеточная сходимость достигается при размере конечного элемента 2 мм. Однако ширина чувствительного элемента используемого тензорезистора равна 2 мм. С учетом необходимости расположения конечных элементов симметрично относительно продольных осей тензорезисторов был выбран характерный размер конечного элемента 1 мм. При таком размере ширина элемента соответствует половине ширины чувствительной части тензорезистора.

Верификация КЭМ упругой клеммы состоит в проверке качества КЭ сетки, проверки корректности выбора типа и характерного размера конечных элементов.

В табл. 2 приведены результаты проверки качества КЭ сетки для клеммы с размером конечного элемента 1 мм.

Для проверки корректности выбора типа конечных элементов и их размера был проведен дополнительный конечно-элементный расчет балки круглого сечения диаметром 17 мм с заделкой одного конца и нагруженной сосредоточенной силой на противоположном конце. Указанная балка имеет идентичные выбранным для моделирования клеммы характеристики

Таблица 2

Результаты проверки качества конечно-элементной сетки**

Table 2

Finite element mesh quality control results**

Проверяемый параметр	Критерий	Показатель*	Среднее значение	Наихудшее значение
Минимальный угол на четырехгранных поверхностях, град	Не менее 10	0 (0 %)	78,36	50,34
Максимальный угол на четырехгранных поверхностях, град	Не более 160	0 (0 %)	102,66	149,75
Соотношение сторон	Не более 5	0 (0 %)	1,61	3,78
Максимальная длина грани, м	Нет	—	0,00125	0,00213
Минимальная длина грани, м	Нет	—	0,00079	0,00039

* Указано количество элементов, выходящих за рамки критерия, в скобках указан процент вышедших за рамки критерия элементов от количества элементов в детали

* The number of elements that exceed the criteria is indicated, the percentage of elements that exceed the criteria from the number of elements in the part is indicated in parentheses

** Источник: составлено авторами по материалам исследования

** Source: compiled by the authors according to research materials

конечных элементов. Результат сравнивался с аналитическим решением.

Расчетная схема представлена на рис. 10.

Исходные данные для проведения аналитического расчета приведены в табл. 3.

Напряжения от изгиба в рассматриваемом сечении составят:

$$\sigma = \frac{32 \cdot F_k \cdot l}{\pi \cdot D^3} = \frac{32 \cdot 2000 \text{ Н} \cdot 0,035 \text{ м}}{\pi \cdot 0,017^3 \text{ м}^3} = 145,2 \text{ МПа}, \quad (1)$$

где F_k — сила, Н; l — плечо, м; D — диаметр рассматриваемого сечения, м.

КЭМ балки с приложенными граничными условиями, аналогичными рис. 10, приведена на рис. 11.

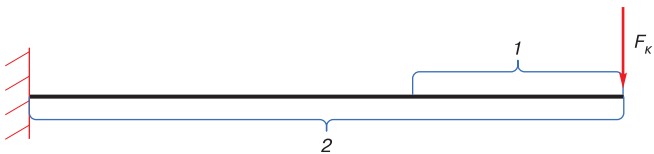


Рис. 10. Расчетная схема нагружения балки*:
1 — плечо для рассматриваемого сечения (35 мм);
2 — длина балки (100 мм)

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 10. Calculation scheme of beam loading*:
1 — lever arm for the considered section (35 mm);
2 — beam length (100 mm)

* Source: compiled by the authors according to research materials

Таблица 3

Исходные данные для аналитического расчета балки*

Table 3

Initial data for analytical calculation of the beam*

Диаметр рассматриваемого сечения D , м	Сила F_k , Н	Плечо силы для рассматриваемого сечения l , м
0,017	2000	0,035

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

* Source: compiled by the authors according to research materials

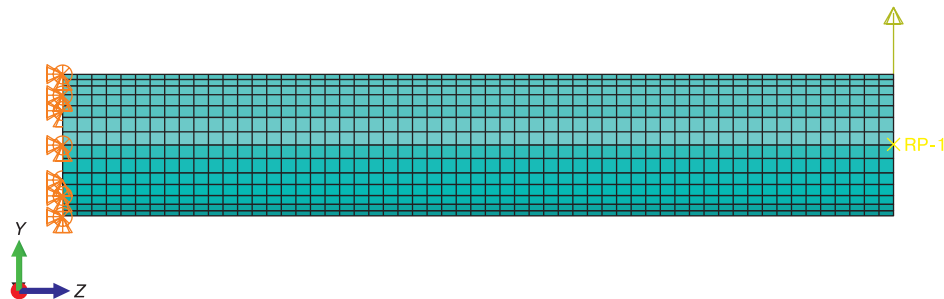


Рис. 11. Конечно-элементная модель балки с приложенными граничными условиями*

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 11. Finite-element model of the beam with applied boundary conditions*

* Source: compiled by the authors according to research materials

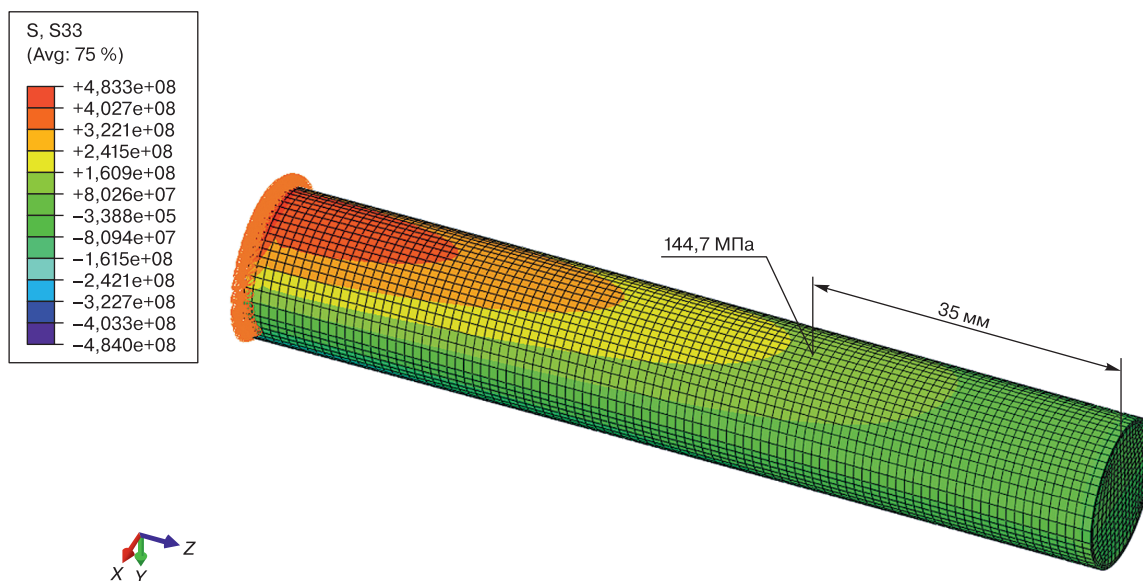


Рис. 12. Распределение напряжений в балке вдоль оси Z^*
 * Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 12. Stress distribution in the beam along the axis Z^*
 * Source: compiled by the authors according to research materials

Распределение напряжений в балке вдоль оси Z (согласно рис. 11) приведено на рис. 12.

Из рис. 12 видно, что максимальное значение напряжений в балке на расстоянии 35 мм от торцевой поверхности равно 144,7 МПа. Погрешность в сравнении с аналитическим расчетом составляет 0,34 %. Это позволяет сделать вывод о корректном выборе типа и размера конечного элемента.

Валидация КЭМ состоит в сравнении результатов натурного и виртуального экспериментов. В процессе проведения натурного эксперимента проведена запись продольного усилия на штоке испытательной машины, продольного перемещения штока и величин выходных сигналов тензорезисторов, пропорциональных их деформациям. Далее величины выходных сигналов переведены в механические напряжения с помощью калибровочного коэффициента.

При проведении виртуального эксперимента была получена зависимость усилия на имитаторе нагружающего приспособления от его перемещения в направлении оси Y_1 согласно рис. 7.

На рис. 13 приведена зависимость продольного усилия на штоке испытательной машины от перемещения штока и зависимость усилия на имитаторе нагружающего приспособления от перемещения имитатора, полученные из результатов натурного и виртуального экспериментов соответственно.

В табл. 4 приведены жесткости клеммы в зоне давления на концевые участки для натурного и виртуального экспериментов. Жесткость клеммы для

натурного и виртуального экспериментов определялась по следующей формуле:

$$C = \frac{F_{25} - F_{20}}{z_{25} - z_{20}}, \quad (2)$$

где F_{25} — усилие на штоке/имитаторе, составило 25 кН;
 F_{20} — усилие на штоке/имитаторе, составило 20 кН;
 z_{25} — перемещение штока/имитатора при усилии 25 кН, мм;
 z_{20} — перемещение штока/имитатора при усилии 20 кН, мм.

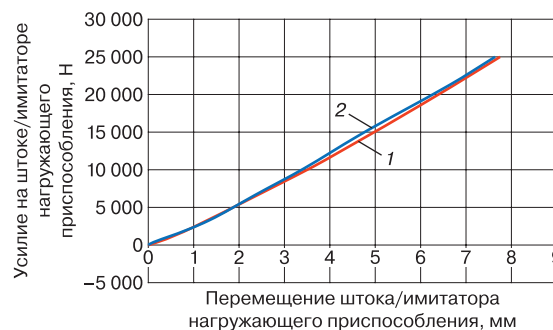


Рис. 13. Зависимость усилия от перемещения для натурного и виртуального экспериментов*:
 1 — зависимость для натурного эксперимента;
 2 — зависимость для виртуального эксперимента

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 13. Force-displacement dependence for natural and virtual experiments*
 1 — dependence for natural experiment;
 2 — dependence for virtual experiment

* Source: compiled by the authors according to research materials

Таблица 4

Жесткости клемм для натурального и виртуального экспериментов*

Table 4

Clamp stiffness for natural and virtual experiments*

Жесткость при натурном эксперименте, кН/мм	Жесткость при виртуальном эксперименте, кН/мм	Погрешность, %
4,10	3,94	4,0

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

Таблица 5

Напряжения в датчиках для натурального и виртуального экспериментов*

Table 5

Stresses in sensors for natural and virtual experiments*

Тензорезистор, №	Напряжение (натурный эксперимент), МПа	Напряжение (виртуальный эксперимент), МПа	Погрешность, %
1	367,6	434,6	15,4
2	363,6	415,8	12,5
3	467,0	542,1	13,8
4	483,2	527,2	8,3

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

Из данных рис. 13 и табл. 4 видно, что результаты виртуального и натурального экспериментов по параметру жесткости клеммы в зоне давления на концевые участки совпадают с погрешностью 4%, т.е. они показали удовлетворительную сходимость.

Были рассчитаны значения механических напряжений в местах фактического расположения тензорезисторов. Вывод расчетных напряжений осуществлялся в узлах, расположенных на внешней поверхности клеммы и находящихся внутри габаритов чувствительной части каждого из наклеенных тензорезисторов, после чего значения в указанных узлах усреднялись. Направления вывода рассчитанных напряжений соответствуют направлениям измерений тензорезисторов.

В табл. 5 приведены напряжения для каждого из четырех тензорезисторов при натурном и виртуальном экспериментах.

Пример распределения напряжений в клемме в направлении измерения первого тензорезистора с указанием зоны его чувствительного элемента приведен на рис. 14 (ось X_2 соответствует направлению измерений, ось Y_2 перпендикулярна направлению измерений).

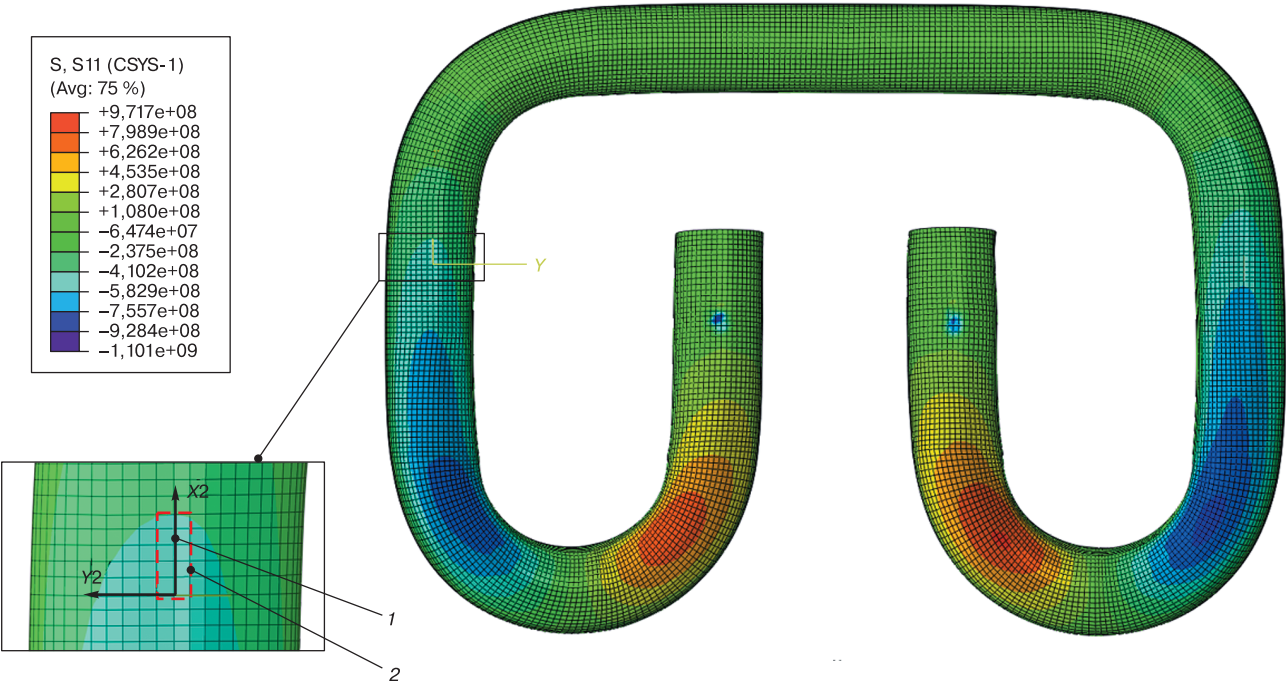


Рис. 14. Распределение напряжений в клемме в направлении оси X_2 первого тензорезистора (вид сверху)*:
1 — направление измерений тензорезистора; 2 — зона чувствительного элемента тензорезистора
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 14. Stress distribution in the clamp in the direction of axis X_2 of the first strain gauge (top view)*:
1 — strain gauge measurement direction; 2 — strain gauge sensing grid area
* Source: compiled by the authors according to research materials

Из табл. 5 видно, что правый боковой участок клеммы (тензорезисторы № 3 и № 4) является более нагруженным, чем левый боковой участок (тензорезисторы № 1 и № 2). Это можно объяснить неплоскостностью клеммы, возникающей в процессе ее производства.

Данные табл. 5 показывают, что сходимость между результатами виртуального и натурального экспериментов по параметру действующих напряжений является удовлетворительной. Погрешности (от 8,3 до 15,4%) могут быть связаны с недостаточной точностью задания положений осей тензорезисторов в КЭМ клеммы. В табл. 6 приведена зависимость среднего напряжения в зоне чувствительного элемента от угла наклона тензорезистора относительно базового положения для тензорезистора № 1.

Из табл. 6 видно, что положение оси тензорезистора в КЭМ клеммы существенно влияет на результат.

На результат натурального эксперимента могли повлиять погрешности, вносимые тензорезисторами и измерительно-вычислительным комплексом с модулем для работы с тензометрическими датчиками, а также погрешность определения калибровочного коэффициента для тензорезисторов. Сумма указанных погрешностей не превышает 3%.

Помимо перечисленного выше, на сходимость может влиять криволинейность поверхности в местах наклейки тензорезисторов на клемме.

Кроме того, на результат натурального эксперимента могла повлиять чувствительность тензорезисторов к поперечным деформациям², а также к касательным деформациям [11] в зоне их наклейки при проведении натурального эксперимента.

На рис. 15 приведено распределение напряжений в поперечном направлении (в направлении оси Y2) относительно направления измерений первого тензорезистора. В зоне положения тензорезистора № 1 среднее значение поперечных напряжений составляет 20 МПа.

На рис. 16 приведено распределение касательных напряжений относительно оси первого тензорезистора. Среднее значение действующих касательных напряжений в зоне положения тензорезистора № 1 в плоскости X2Y2 составляет 420,5 МПа.

Ввиду отсутствия информации от производителя о коэффициенте чувствительности тензорезисторов к поперечным и касательным деформациям, оценить их влияние на показания в направлении измерений не представляется возможным.

Описанный подход к верификации и валидации КЭМ упругой клеммы позволяет получать достаточно достоверные результаты расчетов на упруго-прочностные характеристики.

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, направленные на повышение его эксплуатационной надежности;
- дальнейших научных изысканиях.

Для учета возможного влияния чувствительности тензорезисторов к поперечным и касательным деформациям запланировано проведение дополнительного исследования, направленного на оценку чувствительности используемых тензорезисторов к поперечным и касательным деформациям.

Заключение. В результате проведения исследования выбраны параметры для сравнения результатов натурального и виртуального экспериментов, подготовлен и проведен натуральный эксперимент, разработана и верифицирована конечно-элементная модель упругой клеммы, проведен виртуальный эксперимент, а также проведено сравнение полученных результатов для виртуального и натурального экспериментов.

Таблица 6

Напряжения для натурального и виртуального экспериментов для тензорезистора № 1 в зависимости от изменения направления измерений*

Table 6

Mechanical stresses for natural and virtual experiments for strain gauge No. 1 depending on the change in the direction of measurements*

Напряжения (натурный эксперимент), МПа	Напряжения (виртуальный эксперимент), МПа				
	Смещение положения оси датчика на +2°	Смещение положения оси датчика на +1°	Актуальное положение оси датчика	Смещение положения оси датчика на -1°	Смещение положения оси датчика на -2°
367,6	404,7	419,7	434,6	449,3	463,4
Погрешность, %	9,2	12,4	15,4	18,2	20,7

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

* Source: compiled by the authors according to research materials

² Там же.

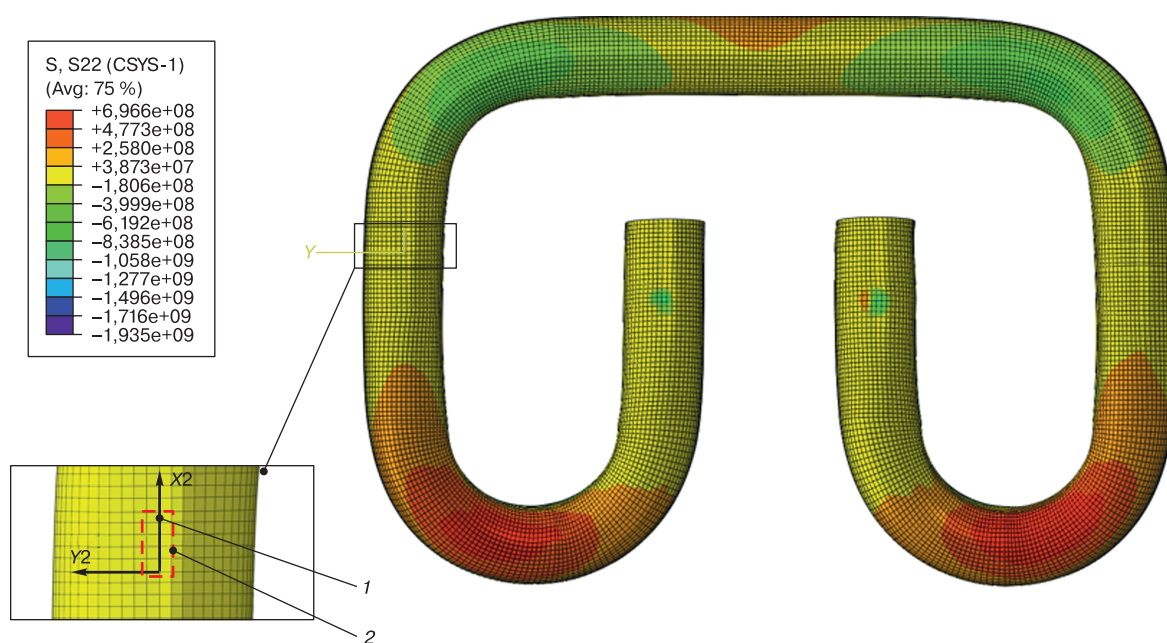


Рис. 15. Распределение напряжений в клемме в направлении оси Y2 первого тензорезистора (вид сверху), Па*:
1 — направление измерений тензорезистора; 2 — зона чувствительного элемента тензорезистора

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 15. Stress distribution in the clamp in the direction of axis Y2 of the first strain gauge (top view)*:

1 — strain gauge measurement direction; 2 — strain gauge sensing grid area

* Source: compiled by the authors according to research materials

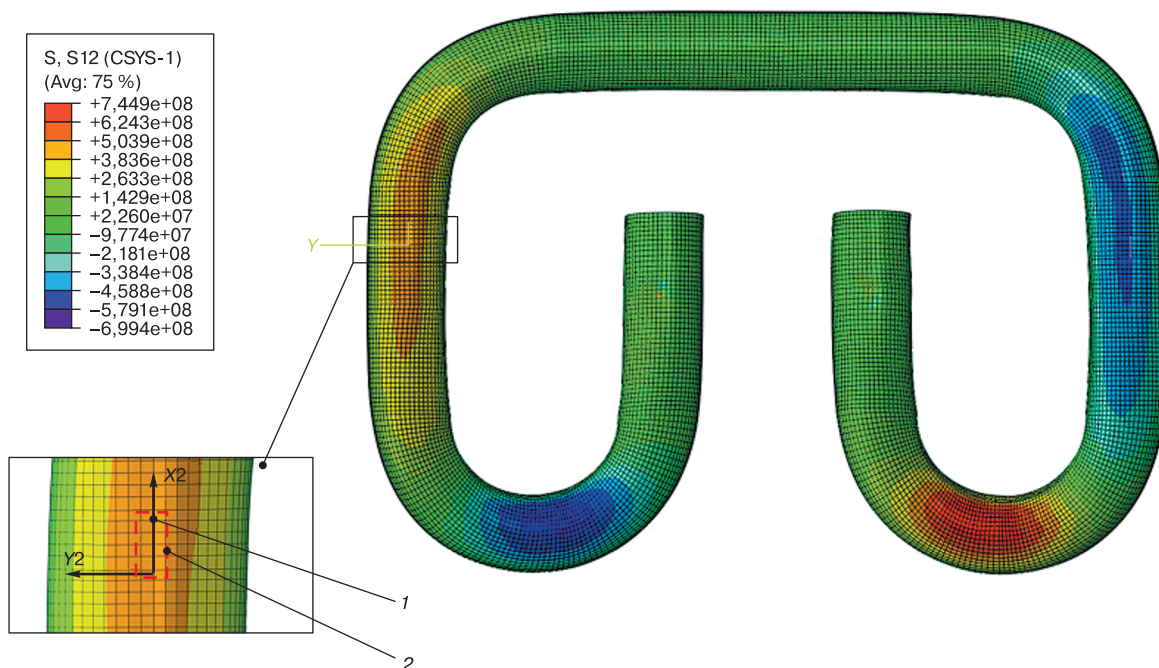


Рис. 16. Распределение касательных напряжений в клемме в плоскости X2Y2 первого тензорезистора (вид сверху)*:
1 — направление измерений тензорезистора; 2 — зона чувствительного элемента тензорезистора

* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 16. Distribution of tangential stresses in the clamp in the plane X2Y2 of the first strain gauge (top view)*:

1 — strain gauge measurement direction; 2 — strain gauge sensing grid area

* Source: compiled by the authors according to research materials

При натурном и виртуальном экспериментах жесткости клеммы составили 4,10 кН/мм и 3,94 кН/мм соответственно. Погрешность результатов составила 4 %. Указанный уровень сходимости является приемлемым.

По параметру «напряжения» наилучшая сходимость между натурной и виртуальной моделью получена для тензорезистора № 4. Напряжения при натурном и виртуальном эксперименте составили 483,2 МПа и 527,2 МПа соответственно. Погрешность результатов составила 8,3 %. Наихудшая сходимость получена для тензорезистора № 1 (натурный эксперимент — 367,6 МПа, виртуальный эксперимент — 434,5 МПа, погрешность — 15,4 %). Погрешности результатов для тензорезисторов № 2 и № 3 составили 12,5 и 13,8 % соответственно.

Выдвинута гипотеза, что такие погрешности по параметру напряжений могут быть связаны:

- с недостаточно точным соответствием направления вывода рассчитанного в КЭМ напряжения и фактического направления наклейки тензорезистора;
- с влиянием чувствительности выбранных тензорезисторов к поперечным и касательным деформациям (требует дополнительных экспериментальных исследований);
- с криволинейной поверхностью клеммы в местах наклейки тензорезисторов.

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. 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;118:553–563. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.053>.

2. Hong X., Xiao G., Haoyu W., Xing L., Sixing W. 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. Hong X., Jia-Bin W., Yan-Rong Z. 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>.

4. Hasap A., Paitekul P., Noraphaiphapaksa N., Kanchanomai C. Analysis of the fatigue performance of elastic rail clip. *Engineering Failure Analysis*. 2018;92:195–204. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.05.013>.

5. Park Y.C., An C., Sim H.B., et al. 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>.

6. Hasap A., Noraphaiphapaksa 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>.

7. Chen Z., Shin M., Wei S., Andrawes B., Kuchma A.D. Finite element modeling and validation of the fastening systems and concrete sleepers used in North America. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2014;228(6):590–602. <https://doi.org/10.1177/0954409714529558>.

8. Любути́н П. С., Панин С. В., Титков В. В., Еремин А. В., Сундер Р. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов // Вестник ПНИПУ. Механика. 2019. № 1. С. 87–107. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.1.08>.

Lyubutin P.S., Panin S.V., Titkov V.V., Yeregin A.V., Sunder R. Development of digital image correlation method to study deformation and fracture processes of structural materials. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2019;(1): 87–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.1.08>.

9. 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>.

10. Кузубов А. С., Бушуев Д. А., Парашук Е. М. Построение и валидация конечно-элементной виртуальной модели балки равного сопротивления весоизмерительной системы // Научные ведомости Белгородского Государственного Университета. 2019. № 3 (2). С. 274–282. <https://doi.org/10.18413/2411-3808-2019-46-2-274-282>.

Kuzubov A.S., Bushuev D.A., Parashchuk E.M. Construction and validation of the finite element virtual model of the beam of equal resistance of the weight measurement system. *Belgorod State University Scientific Bulletin*. 2019;46(2):274–282. (In Russ.). <https://doi.org/10.18413/2411-3808-2019-46-2-274-282>.

11. Волков А. Д., Евтухович А. С., Моисеенко А. С., Соби́ров Б. М., Цамалаидзе З., Цверева Н. Влияние внутреннего давления на натяжение в сварных строу трекового детектора // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6, № 1. С. 83–90. EDN: <https://www.elibrary.ru/yrsngn>.

Volkov A.D., Evtoukhovich P.G., Moiseenko A.S., Sabirov B.M., Tsamalaide Z., Tsverava N. Influence of internal pressure on stress of welded straws of track detectors. *Advances in Applied Physics*. 2018;6(1): 83–90. (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/yrsngn>.

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), <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-п., д. 40), <https://orcid.org/0009-0004-7722-7032>

Александр Викторович ГРЕЧАНИК, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория «Путеиспытательная», Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), Author ID: 1057381, <https://orcid.org/0009-0005-8678-2991>

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.), <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>

Alexander V. GRECHANIK, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Track Testing Research Laboratory, Russian University of Transport (127994, Moscow, bldg. 9, 9, Obraztsova St.), Author ID: 1057381, <https://orcid.org/0009-0005-8678-2991>

ВКЛАД АВТОРОВ

Вадим Олегович БЕРЕЗИН. Постановка целей и задач исследования, проведение натурного эксперимента, проведение расчетов, анализ результатов, написание текста статьи (60 %).

Александр Владимирович ЗАМУХОВСКИЙ. Постановка целей и задач исследования, общее руководство исследованием, проведение натурного эксперимента, 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 %).

Александр Викторович ГРЕЧАНИК. Постановка целей и задач исследования, подготовка к проведению натурного эксперимента, проведение натурного эксперимента, редактирование текста статьи (10 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vadim O. BEREZIN. Setting research goals and objectives, conducting field experiments, carrying out calculations, results analysis, article writing (60 %).

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 %).

Alexander V. GRECHANIK. Setting research goals and objectives, preparation for the field experiment, conducting field experiment, article editing (10 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 27.01.2025, рецензия от первого рецензента получена 04.02.2025, рецензия от второго рецензента получена 06.02.2025, рецензия от третьего рецензента получена 24.04.2025, рецензия от четвертого рецензента получена 25.04.2025, принята к публикации 02.06.2025.

The article was submitted 27.01.2025, first review received 04.02.2025, second review received 06.02.2025, third review received 24.04.2025, fourth review received 25.04.2025, accepted for publication 02.06.2025.