

Оригинальная статья

УДК 625.143(045)

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

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



Определение напряженно-деформированного состояния упругой клеммы рельсового скрепления W30

В. С. Коссов, О. Г. Краснов✉, М. В. Тимаков,
А. Л. Протопопов, С. В. Чунин, М. А. Литвинов

Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ВНИКИ),
Коломна, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании упругих клемм промежуточных рельсовых скреплений проводится оценка их прочностных характеристик. В современных условиях этот вопрос решается моделированием на основе метода конечных элементов. Для получения достоверных результатов расчёта проводится верификация конечно-элементной модели. Целью статьи является моделирование упругой клеммы Skl 14 промежуточного рельсового скрепления W30, а также верификация полученных результатов путем тензометрирования клеммы при статическом нагружении на стенде.

Материалы и методы. Для моделирования напряженно-деформированного состояния упругой клеммы Skl 14 разработана конечно-элементная модель клеммы, которая включает 450 000 элементов типа «тетраэдр» размером 1 мм и 90 000 узлов. Для проведения верификации разработанной модели и результатов расчета проведены лабораторные испытания натурной клеммы с определением напряжений кручения и изгиба методом тензометрирования. Датчики базой $l = 5$ мм для регистрации касательных напряжений от кручения наклеивались под углом 45° на диаметрально противоположных участках прутка на внешнем и внутреннем радиусах в зонах технологических перегибов упругой клеммы. Для регистрации изгибных напряжений датчики наклеивали в верхней части наружных поперечных участков упругой клеммы.

Результаты. Выполнена виртуальная и экспериментальная тарировка упругой клеммы. Расчетным путем определены напряжения кручения, изгиба и эквивалентные. Показано, что наиболее высокий уровень эквивалентных напряжений наблюдается в зонах технологических перегибов. Выполнен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений напряжений в контрольных точках.

Обсуждение и заключение. Средняя величина расхождений по 13 контрольным точкам составила 10,1 %. Это позволяет сделать вывод, что разработанная конечно-элементная модель упругой клеммы Skl 14 с достаточной для практического применения точностью может использоваться для определения ее напряженно-деформированного состояния, уровни напряжений могут стать эталонами при разработке новых конструкций клемм. Исследования напряженно-деформированного состояния упругих клемм целесообразно продолжить в условиях эксплуатации с определением влияния скорости движения, осевой нагрузки, конструкции экипажных частей, состояния колесных пар и состояния поверхности катания рельсов, а также с использованием примененной методики анализа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: промежуточное рельсовое скрепление, упругая клемма, конечно-элементная модель, касательные, изгибные, эквивалентные напряжения, тензометрирование, верификация, сходимость

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Коссов В. С., Краснов О. Г., Тимаков М. В., Протопопов А. Л., Чунин С. В., Литвинов М. А. Определение напряженно-деформированного состояния упругой клеммы рельсового скрепления W30 // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 1. С. 51–59.

Original article

UDK 625.143(045)

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

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



Determining the stress-strain state of the elastic clip of rail fastening W30

Valery S. Kossov, Oleg G. Krasnov✉, Maksim V. Timakov,
Andrey L. Protopopov, Sergey V. Chunin, Maksim A. Litvinov

Research, Design and Technology Institute of Rolling Stock,
Kolomna, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article provides performance evaluation of the elastic clip of intermediate rail fastening during their strength characteristics assessment. In modern conditions this issue is solved by modelling using the finite element method. In order to obtain reliable calculation results, the authors carry out verification of the finite element model. The purpose of the article is to model Skl 14 elastic clip of W30 intermediate rail fastening, as well as to verify the obtained results of the clip under static loading on the test bench by strain-gauging method.

Materials and methods. For stress-strain modelling the researchers developed a finite element model of the elastic clip, which includes 450,000 elements of the tetrahedron type of size 1 mm and 90,000 nodes. In order to verify the developed model and the calculation results, laboratory tests of full-scale terminal were carried out while determining tangential and bending stresses by strain-gauging method of a full-scale clip were performed while determining torsional and bending stresses by the strain-gauging method. Sensors with base of $l = 5$ mm for recording tangential stresses due to torsion were glued at 45° on diametrically opposite sections of the bar on the outer and inner radii in the zones of technological bends of the elastic clip. Sensors were glued on the upper part of the outer transverse sections of the elastic clip to register bending stresses.

Results. Virtual and experimental calibration of the elastic clip was performed. Calculation tests were conducted to determine tangential, bending and equivalent stresses. They showed that the highest level of equivalent stresses is observed in the zones of technological bends. A comparative analysis of calculated and experimental values of stresses at measuring points was performed.

Discussion and conclusion. The average value of discrepancies for 13 test points was 10.1%, which allows to conclude that the developed finite element model of Skl 14 elastic clip with a sufficient accuracy for practical application could be used to determine its stress-strain state, and the stress levels may become standards for the development of new clip designs. It is advisable to continue studies of the stress-strain state of elastic clips under operating conditions with the determination of speed influence, axial load, undercarriage design, condition of wheel pairs and tread of rails, as well as to use the applied analysis methodology.

KEYWORDS: intermediate rail fastening, elastic clip, finite element model, tangential, bending and equivalent stresses, strain-gauging method, verification, convergence

FOR CITATION: Kossov V.S., Krasnov O.G., Timakov M.V., Protopopov A.L., Chunin S.V., Litvinov M.A. Determining the stress-strain state of the elastic clip of W30 rail fastening. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(1):51–59. (In Russ.).

Введение. Рельсовые крепления служат для крепления рельсов к шпалам, выполняя при этом ряд важных задач:

- сохранять стабильность рельсовой колеи;
- упруго передавать динамические воздействия от колес железнодорожного подвижного состава;
- гасить высокочастотные вибрации, интенсифицирующие накопление остаточных деформаций балластного слоя земляного полотна железнодорожного пути;
- обеспечивать достаточное сопротивление продольному перемещению рельса.

На российских железных дорогах с рельсовыми креплениями системы W30 Vossloh (Фосло) эксплуатируется 2269 км железнодорожного пути, или 2 % от общей протяженности [1].

Недостатком рельсовых креплений системы W30 является непрочность боковых полимерных упоров Wfp 30K-12NT [2].

Упругая клемма Skl 14 является элементом узла рельсового крепления системы W30 (рис. 1), которая создает стабильное прижимное усилие и сопротивление угону рельса. Центральная петля упругой клеммы предотвращает раскantungку рельса, а также защищает свободные концы клеммы от деформаций.

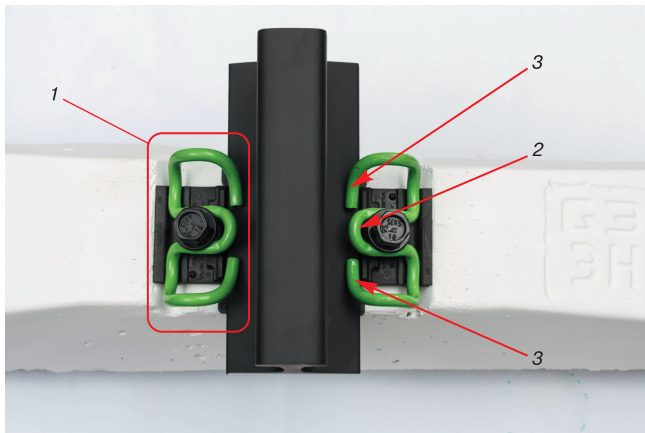


Рис. 1. Общий вид промежуточного рельсового крепления системы W30*:

1 — упругая клемма Skl 14; 2 — центральная петля упругой клеммы; 3 — свободные концы клеммы

* Источник: сайт компании Vossloh¹

Fig. 1. General view of the intermediate rail fastening of W30 system*:

1 — Skl 14 elastic clip; 2 — central loop of elastic clip; 3 — free clip ends

* Source: Vossloh company website¹

В связи с развитием в России высокоскоростного движения конструкции железнодорожного пути с ресурсом 2,5 млрд т брутто пропущенного тоннажа российскими конструкторами разрабатываются новые типы

промежуточных рельсовых клемм. Учитывая положительный опыт эксплуатации упругих клемм Skl 14, разработчики рельсовых креплений ЖБР-65ПШР (модернизированное), ЖБР-65ПШТ, ИЦТ2П.1, ИЦТ2У.2 применили форму упругих клемм в виде пространственного кривого бруса. Для отработки конструкций вновь разрабатываемых упругих клемм важно иметь верифицированную конечно-элементную модель. Создание надежных конструкций упругих клемм позволит повысить потребительские свойства рельсовых креплений и ресурс пути в целом.

Материалы и методы. Для определения допустимых уровней эквивалентных напряжений в настоящей статье поставлена цель исследовать напряженно-деформированное состояние упругой клеммы Skl 14, как прошедшей широкую эксплуатационную апробацию.

Для определения напряженно-деформированного состояния упругих клемм Skl 14 теоретическими и экспериментальными методами необходимо изучить зависимости напряжений изгиба и кручения, а также перемещения усов упругой клеммы от приложенной силы. Для проведения теоретических исследований была разработана конечно-элементная модель упругой клеммы, представленная на рис. 2.

Вариации размера и типа конечных элементов при нагружении единичной силой привели к выбору в пользу элемента типа «тетраэдр» размером 1 мм.

Конечно-элементная модель упругой клеммы включает 450 000 элементов типа «тетраэдр», образованных 90 000 узлами. Была выполнена виртуальная тарировка упругой клеммы Skl 14 и произведено сравнение результатов с натурным экспериментом. Конечно-элементная модель клеммы в зоне центральной петли через пластик, имитирующий плоскую шайбу, нагружалась вертикальной ступенчатой нагрузкой. При увеличении силы, имитирующей величину затяжки путевого шурупа, увеличивался прогиб центральной петли, и с шагом 1 мм фиксировалась величина этой силы в данный момент (рис. 2). График зависимости прогиба упругой клеммы Skl 14 от величины вертикальной силы, прикладываемой к упругой клемме, представлен на рис. 3.

Из графика видно, что при прогибе центральной петли клеммы 8 мм усилие прижатия имитатора шурупа к центральной петле составляет 21 кН. Величины эквивалентных напряжений в клемме и их распределение представлены на рис. 4. Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что максимальные эквивалентные напряжения возникают в зонах технологических перегибов.

¹ Сайт компании Vossloh [Электронный ресурс]: <https://vossloh-rail.ru/wp-content/uploads/2020/10/1-%D1%81%D0%BA%D1%80%D0%B5%D0%BF%D0%BB-scaled.jpg> (дата обращения: 13.02.2025).

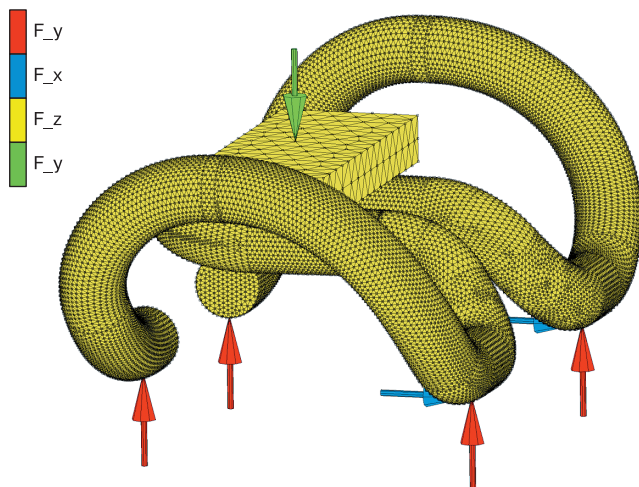


Рис. 2. Конечно-элементная модель упругой клеммы промежуточного рельсового крепления системы W30*: зеленой стрелкой обозначена сила, приложенная к металлическому платику; красными стрелками обозначены закрепления модели от вертикальных смещений в зоне контакта со скреплением; синими стрелками обозначены закрепления модели от горизонтальных поперечных смещений в зоне контакта со скреплением; на плоскости симметрии модель закреплена от продольных горизонтальных смещений в зоне контакта со скреплением

* Источник: разработано авторами

Fig. 2. Finite element model of the elastic clip of the intermediate rail fastening system W30*: the green arrow indicates the force applied to the metal pad; the red arrows indicate the anchoring of the model from vertical displacements in the contact surface with the clip; the blue arrows indicate the anchoring of the model from horizontal transverse displacements in the contact surface with the clip; on the centre plane the model is fixed from longitudinal horizontal displacements in the contact surface with clip

* Source: developed by the authors

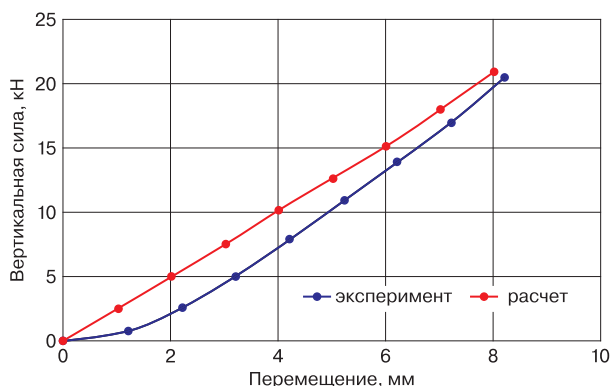


Рис. 3. Зависимости прогиба упругой клеммы Skl 14 от величины вертикальной силы, прилагаемой к упругой клемме промежуточного рельсового крепления системы W30*: синяя линия — эксперимент; красная линия — расчет

* Источник: разработано авторами

Fig. 3. Dependences of the deflection of Skl 14 elastic clip on the magnitude of the vertical force applied to the elastic clip of the intermediate rail fastening system W30*: blue line — experiment; red line — calculation

* Source: developed by the authors

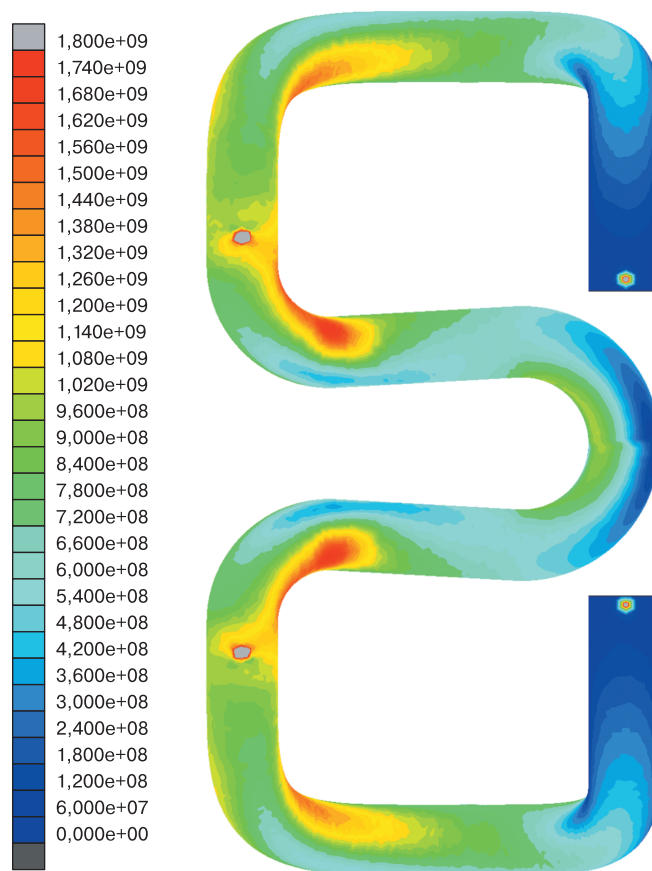


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние упругой клеммы Skl 14 при виртуальном прогибе центральной петли*

* Источник: разработано авторами

Fig. 4. Stress-strain state of Skl 14 elastic clip at virtual deflection of the central loop*

* Source: developed by the authors

Для более наглядного представления уровней эквивалентных напряжений упругой клеммы Skl 14 рассмотрены фрагменты с контрольными точками. Наиболее характерные представлены на рис. 5. В контрольных измерительных точках, расположенных в характерных зонах, определялись усредненные уровни напряжений по нескольким узловым точкам, расположенным на поверхности клеммы, что характерно для тензодатчиков базой 5 мм, которые применялись при экспериментальных исследованиях.

Для верификации разработанной конечно-элементной модели по величинам механических напряжений были проведены экспериментальные исследования по изучению зависимости напряжений изгиба и кручения от приложенной силы. Выполнены лабораторные испытания натурной клеммы с определением напряжений кручения, а также изгиба методом тензометрирования. Датчики базой $l = 5$ мм для регистрации касательных напряжений от кручения

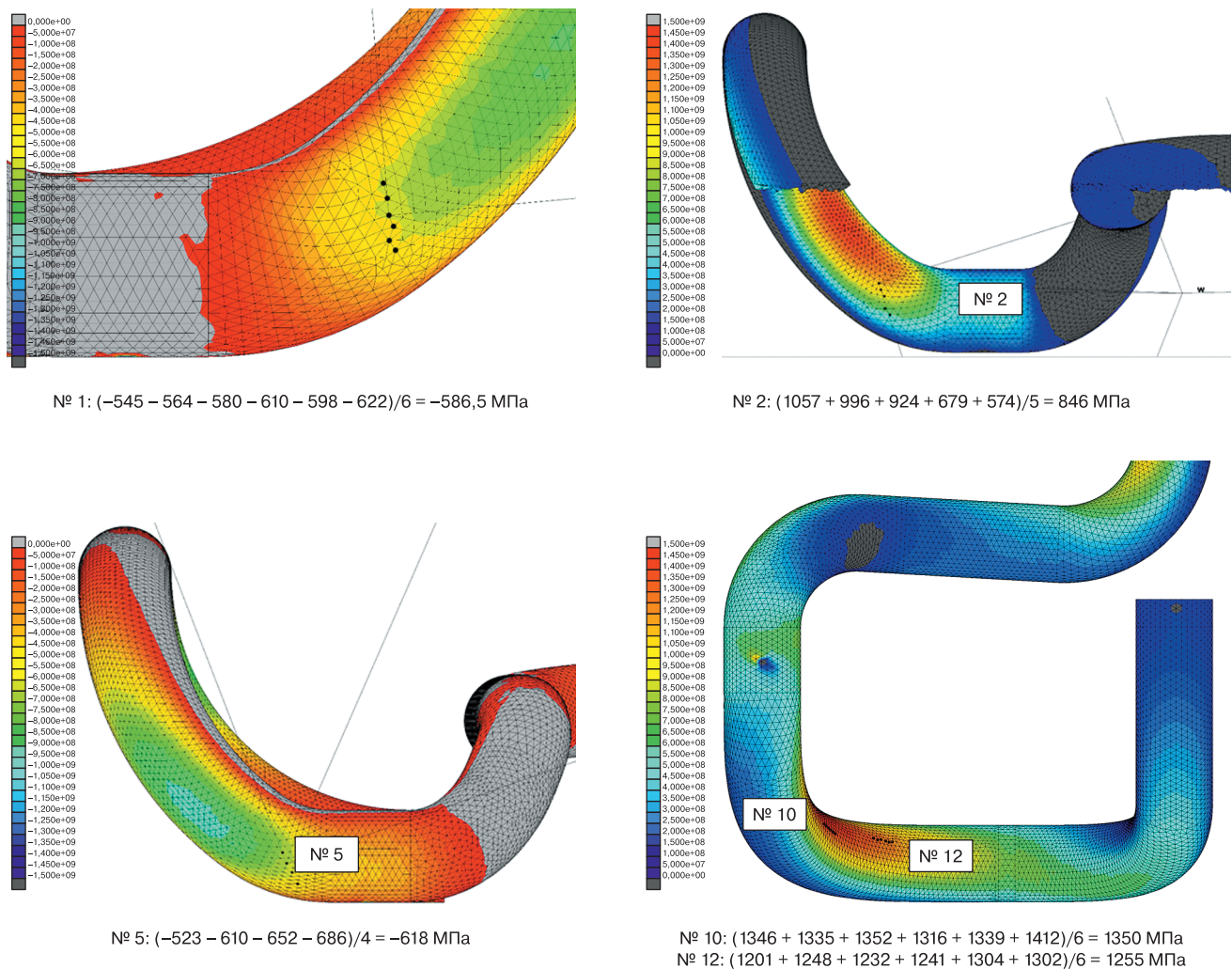


Рис. 5. Характерные фрагменты упругой клеммы Skl 14 промежуточного рельсового крепления системы W30: осреднение значений механических напряжений по узлам, попадающим в зону наклейки тензодатчика базой 5 мм в заданном направлении по его длине и ширине*

* Источник: разработано авторами

Fig. 5. Characteristic fragments of Skl 14 elastic clip of the intermediate rail fastening of the W30 system: averaging of mechanical stress values over nodes getting into the area of the strain-gauging sensor setting with a base of 5 mm in a given direction along its length and width*

* Source: developed by the authors

наклеивались под углом 45° на диаметрально противоположных участках прутка на внешнем и внутреннем радиусах в зонах технологических перегибов упругой клеммы. Для регистрации изгибных напряжений датчики наклеивали в верхней части наружных поперечных участков упругой клеммы в соответствии со схемой (рис. 6). На клемму крепления были установлены тензорезисторы № 1–8 для измерения напряжений кручения и № 9–16 для измерения напряжений, действующих в продольном относительно оси прутка направлении.

Общий вид упругой клеммы Skl 14 промежуточного рельсового крепления системы W30 с установленными тензорезисторами показан на рис. 7.

Клемма Skl 14, оборудованная тензорезисторами для измерения напряжений кручения и изгиба, установленная в ложементе для нагружения на испытательной машине ИК-100, показана на рис. 8, а. Клемма Skl 14 ступенчато нагружалась вертикальной силой при перемещениях 0, 1, 2...8 мм на испытательной машине ИК-100. Процесс нагружения клеммы вертикальной силой и перемещения центральной петли упругой клеммы от приложенной силы показан на рис. 8, б. При каждой ступени нагружения проводилась регистрация напряжений с выводом результатов на измерительный комплекс.

Результаты. Результаты измерений напряжений представлены в табл. 1.

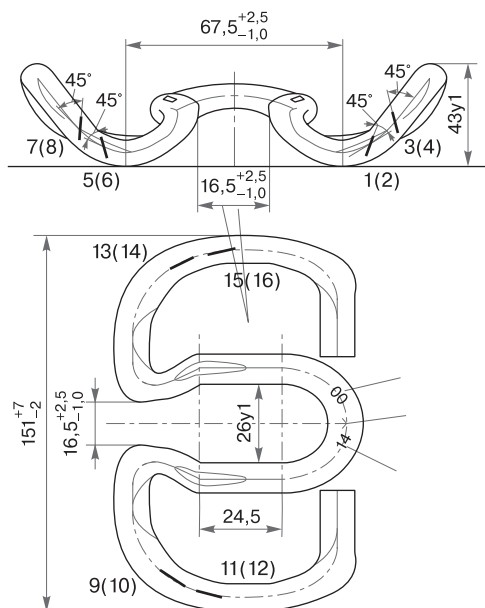


Рис. 6. Схема расположения и нумерация контрольных точек (датчиков) для измерения механических напряжений в клемме промежуточного рельсового скрепления системы W30*:
1–8 — датчики для измерения напряжений кручения; 9–16 — датчики для измерения напряжений, действующим в продольном относительно оси прутка направлении
* Источник: разработан авторами

Fig.6. Layout and numbering of measuring points (sensors) for measuring mechanical stresses in clip of the intermediate rail fastening system W30*:
1–8 — sensors for measuring tangential stresses; 9–16 — sensors for measuring stresses acting longitudinally relative to the axis of the rod
* Source: developed by the authors

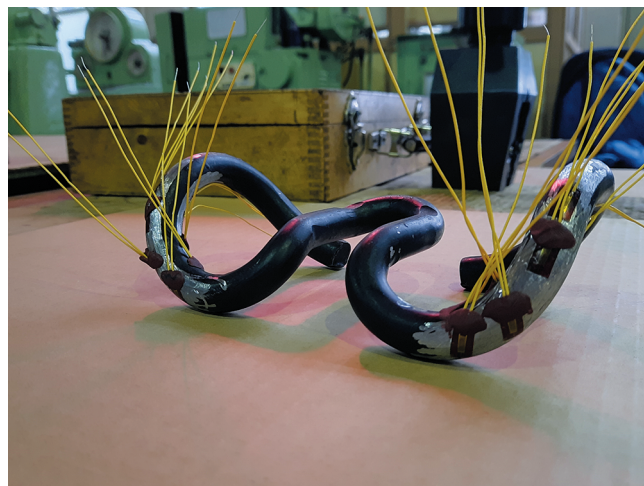


Рис. 7. Расположение измерительных схем тензодатчиков на упругой клемме Skl 14 промежуточного рельсового скрепления системы W30*
* Источник: фото авторов

Fig. 7. Arrangement of the measuring circuits of strain gauge sensors on Skl 14 elastic clip of the intermediate rail fastening of the W30 system*
* Source: authors photo

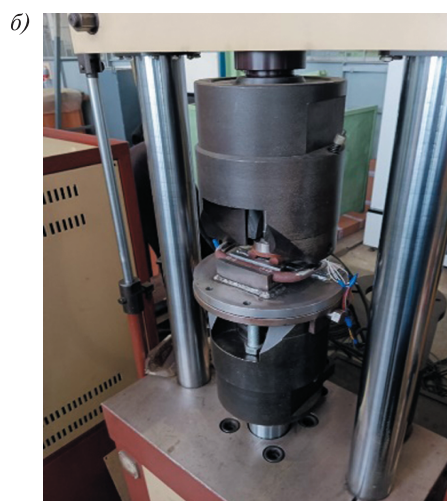


Рис. 8. Стендовые испытания упругой клеммы на универсальной машине для испытаний материалов ИК-100.01М*:
а) установленная в ложементе клемма, оборудованная тензорезисторами для измерения напряжений кручения и изгиба;
б) процесс нагружения клеммы вертикальной силой и перемещения центральной петли упругой клеммы
* Источник: фото авторов

Fig. 8. Bench tests of an elasticclip on a universal material testing machine IK-100.01M*:
а) clip installed in the base plate, equipped with strain gauges for measuring tangential and bending stresses;
б) the process of loading the clip with vertical force and moving the central loop of the elastic clip
* Source: authors photo

Таблица 1

Результаты измерений напряжений (МПа) в контрольных точках (1–16) для разных значений пошаговых вертикальных перемещений*

Table 1

The results of stress measurements (MPa) at measuring points (1–16) for different values of gradual vertical movements*

№ точки	Перемещение, мм								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	–4	–70	–130	–195	–264	–337	–411	–485	–560
2	0	104	189	273	362	455	550	640	731
3	–1	–56	–105	–157	–215	–276	–337	–398	–462
4	–1	45	100	150	190	230	290	350	420
5	7	–23	–88	–161	–241	–331	–427	–520	–610
6	–4	41	142	258	385	523	657	794	929
7	–1	–30	–92	–162	–236	–313	–397	–484	–572
8	0	13	43	76	112	149	187	227	268
9	0	–119	–234	–355	–484	–607	–725	–850	–971
10	3	126	246	373	507	635	762	897	1040
12	3	136	264	399	540	672	791	925	1053
13	0	–47	–150	–265	–387	–509	–634	–762	–889
14	–1	66	212	378	552	726	906	1093	1289
15	1	–41	–130	–231	–333	–430	–533	–638	–740
16	–1	58	184	326	470	603	748	896	1039

* Источник: разработано авторами

* Source: developed by the authors

Обсуждение. Анализ уровней касательных напряжений (контрольные точки 1–8) показал, что последние изменяются в широком диапазоне. Датчики, расположенные на противоположных сторонах прутка, фиксируют касательные напряжения противоположного знака — напряжения сжатия «–» и напряжения растяжения «+». Средние величины касательных напряжений в зонах технологических перегибов составляли 569 МПа, при этом максимальные значения достигали 929 МПа. Их величины в значительной степени зависели от точности пространственной ориентации при наклеивке датчиков. Согласно [2] подтверждается вывод о том, что фактическое место и величина максимального напряжения упругой клеммы не могут быть точно определены тензодатчиками.

В контрольных точках 9–16, которые располагались в зонах технологических перегибов в прутках клеммы, возникает многоосное напряженное состояние, которое определяется одновременным действием крутящих и изгибающих моментов. Многоосное напряженное состояние в зонах технологических перегибов приводит к возникновению высоких значений эквивалентных напряжений, которые достигают значений 1255...1289 МПа. Проведенные экспериментальные измерения, выполненные методом

тензометрирования, показали уровни напряжений в этих точках ниже на 150...200 МПа. При этом средние уровни эквивалентных напряжений достигали 1003 МПа, максимальные — 1289 МПа. При этом согласно [3] предел прочности материала упругих клемм равен 1300 МПа. Учитывая, что уровни динамических напряжений в клеммах от воздействия подвижного состава в прямых участках пути и кривых радиусом более 650 м определяются прогибами подрельсового основания под поездной нагрузкой, которая достигает 1...1,3 мм [4], средние уровни динамических напряжений носят разгрузочный характер и не превышают 30...40 МПа [5]. Это определяет коэффициент запаса по усталости, близкий к единице, что считается допустимым для пружин [6] и подтверждается успешным опытом эксплуатации креплений Skl 14 как на отечественных, так и зарубежных железных дорогах.

В табл. 2 приведены сравнительные напряжения в контрольных точках упругой клеммы Skl 14 при величине статического прогиба 8 мм, полученные при проведении моделирования и экспериментальных измерений.

К анализу принимались контрольные точки, в которых различие не превышало 25%. Выбросы имели место в трех точках из шестнадцати: 4, 6, 8. Средняя

величина расхождений по 13-ти контрольным точкам составила 10,1%. Это позволяет сделать вывод, что разработанная конечно-элементная модель упругой клеммы Skl 14 с достаточной для практического применения точностью может использоваться для определения ее напряженно-деформированного состояния.

Таблица 2

Сравнительные напряжения в контрольных точках, полученных расчетным и экспериментальным путем*

Table 2

Comparative stresses in measuring points obtained by calculation and experiment*

№ контрольной точки	Напряжения в контрольных точках по расчетным данным, МПа	Напряжения в контрольных точках по экспериментальным данным, МПа	Погрешность, %
1	586	560	4,4
2	846	731	13,5
3	477	462	3,1
4	730	420	42,4
5	618	610	1,3
6	576	929	38
7	606	572	5,6
8	913	268	70,5
9	978	971	0,7
10	1350	1040	22,9
11	989	940	4,9
12	1255	1053	16
13	991	889	10,3
14	1437	1289	10,2
15	919	740	19,4
16	1298	1039	19,9

* Источник: разработана авторами

* Source: developed by the authors

Заключение

1. Разработанная конечно-элементная модель упругой клеммы Skl 14 с достаточной для практического применения точностью может использоваться для определения ее напряженно-деформированного состояния.

2. Выполненное моделирование позволило установить количественные величины касательных и эквивалентных напряжений в упругой клемме Skl 14 при нагружении квазистатической вертикальной нагрузкой.

3. Показано, что в зоне технологических перегибов в прутках клеммы возникает многоосное напряженное состояние, которое определяется одновременным действием крутящих и изгибающих моментов.

4. Многоосное напряженное состояние в зонах технологических перегибов приводит к возникновению высоких значений эквивалентных напряжений, которые достигают значений 1255...1289 МПа. Проведенные измерения, выполненные методом тензометрирования, показали, что уровни напряжений в этих точках ниже на 150...200 МПа.

5. Уровни динамических напряжений носят разгрузочный характер и не превышают 30...40 МПа, что определяет коэффициент запаса по усталости, близкий к единице. Это считается допустимым для пружин и подтверждается успешным опытом эксплуатации креплений Skl 14 как на отечественных, так и зарубежных железных дорогах.

6. Предлагается продолжить исследования напряженно-деформированного состояния упругих клемм в условиях эксплуатации с определением влияния скорости движения, осевой нагрузки, конструкции экипажных частей, состояния колесных пар и состояния поверхности катания рельсов.

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

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Прокопенко О.С. Эксплуатация рельсовых креплений на сети и новые разработки // Путь и путевое хозяйство. 2023. № 2. С. 12–16. EDN: <https://elibrary.ru/bjtkvq>.
2. Prokopenko O.S. Operation of rail fastenings on the network and new developments. *Railway track and track facilities*. 2023;(2):12–16. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/bjtkvq>.
3. Ермаков В.М. Крепления для железобетонных шпал: требования, обоснования, оценка // Путь и путевое хозяйство. 2009. № 2. С. 9–16. EDN: <https://elibrary.ru/ppdxrb>.
4. Ermakov V.M. Fastenings for reinforced concrete sleepers: requirements, justifications, assessment. *Railway track and track facilities*. 2009;(2):9–16. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/ppdxrb>.
5. Кириленков С.А. Опыт эксплуатации креплений Vossloh и Pandrol на Октябрьской дороге // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 8. С. 24–25. EDN: <https://elibrary.ru/vbbpnx>.
6. Kirilenkov S.A. Operation experience of Vossloh and Pandrol fastenings on the Oktyabrskaya railway. *Railway track and track facilities*. 2015;(8):24–25. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/vbbpnx>.
7. Прокопенко О.С., Радугин С.Ю., Низамиев М.Р. Перспективные решения для инфраструктурного комплекса // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 8. С. 6–7. EDN: <https://elibrary.ru/yqddsf>.
8. Prokopenko O.S., Radygin S.Yu., Nizamiyev M.R. Promising solutions for the system infrastructure. *Railway track and track facilities*. 2020;(8):6–7. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/yqddsf>.
9. Коссов В.С., Бидуля А.Л., Краснов О.Г. Нагруженность упругих клемм крепления APC-4 при тяжеловесном движении //

Путь и путевое хозяйство. 2017. № 11. С. 20–23. EDN: <https://elibrary.ru/zssosb>.

Kossov V.S., Bidulya A.L., Krasnov O.G. Loading of elastic clips of fastenings ARS-4 during heavy-haul traffic. *Railway track and track facilities*. 2017;(11):20–23. (In Russ.). EDN: <https://elibrary.ru/zssosb>.

6. Ling L., Li W., Shang H., Xiao X., Wen Z., Jin X. Experimental and numerical investigation of the effect of rail corrugation on the behavior of rail fastenings. *Vehicle System Dynamics*. 2014;52(9):1211–1231. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.934844>.

7. Mohammadzadeh S., Ahadi S., Nouri M. Stress-based fatigue reliability analysis of the rail fastening spring clip under traffic loads. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2014;11(6):993–1011. <https://doi.org/10.1590/S1679-78252014000600006>.

8. Sadeghi J., Fesharaki M., Khajehdezfuly A. Influences of train speed and axle loads on life cycle of rail fastening clips. *Transactions of The Canadian Society for Mechanical Engineering*. 2015;39(1):1–11. <https://doi.org/10.1139/tcsme-2015-0001>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Валерий Семенович КОССОВ,

д-р техн. наук, профессор, генеральный директор, Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ВНИКТИ, 140402, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 410), Author ID: 353160

Олег Геннадьевич КРАСНОВ,

д-р техн. наук, заведующий отделом пути и специального подвижного состава, Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ВНИКТИ, 140402, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 410), Author ID: 355854

Максим Владимирович ТИМАКОВ,

заведующий лабораторией прочностных расчетов, Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ВНИКТИ, 140402, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 410), Author ID: 1029566

Андрей Леонидович ПРОТОПОПОВ,

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ВНИКТИ, 140402, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 410), Author ID: 882840

Сергей Владимирович ЧУНИН,

канд. техн. наук, заведующий лабораторией испытаний на усталость, Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ВНИКТИ, 140402, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 410), Author ID: 1217811

Максим Алексеевич ЛИТВИНОВ,

научный сотрудник, Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава (ВНИКТИ, 140402, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, д. 410), <https://orcid.org/0009-0001-3228-1711>.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery S. KOSSOV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director, Research, Design and Technology Institute of Rolling Stock (140402, Kolomna, 410, Oktyabrskoy revolyutsii St.), Author ID: 353160

Oleg G. KRASNOV,

Dr. Sci. (Eng.), Head of Track and Special Rolling Stock Department, Research, Design and Technology Institute of Rolling Stock (140402, Kolomna, 410, Oktyabrskoy revolyutsii St.), Author ID: 355854

Maksim V. TIMAKOV,

Head of Strength Calculation Laboratory, Research, Design and Technology Institute of Rolling Stock (140402, Kolomna, 410, Oktyabrskoy revolyutsii St.), Author ID: 1029566

Andrey L. PROTOPOPOV,

Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Research, Design and Technology Institute of Rolling Stock (140402, Kolomna, 410, Oktyabrskoy revolyutsii St.), Author ID: 882840

Sergey V. CHUNIN,

Cand. Sci. (Eng.), Head of Fatigue Testing Laboratory, Research, Design and Technology Institute of Rolling Stock (140402, Kolomna, 410, Oktyabrskoy revolyutsii St.), Author ID: 1217811

Maksim A. LITVINOV,

Research Scientist, Research, Design and Technology Institute of Rolling Stock (140402, Kolomna, 410, Oktyabrskoy revolyutsii St.), <https://orcid.org/0009-0001-3228-1711>

ВКЛАД АВТОРОВ

Валерий Семенович КОССОВ. Методическое и научное сопровождение, научное редактирование статьи (15 %).

Олег Геннадьевич КРАСНОВ. Анализ данных, написание статьи (15 %).

Максим Владимирович ТИМАКОВ. Разработка компьютерной модели упругой клеммы (20 %).

Андрей Леонидович ПРОТОПОПОВ. Разработка конечно-элементной модели упругой клеммы (20 %).

Сергей Владимирович ЧУНИН. Проведение экспериментальных исследований (20 %).

Максим Алексеевич ЛИТВИНОВ. Проведение расчетов, участие в лабораторных испытаниях (10 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Valery S. KOSSOV. Methodological and scientific assistance, scientific article editing (15 %).

Oleg G. KRASNOV. Data analysis, article writing (15 %).

Maksim V. TIMAKOV. Elastic clip computer model design (20 %).

Andrey L. PROTOPOPOV. Development of a finite element elastic clip model (20 %).

Sergey V. CHUNIN. Experimental research conduction (20 %).

Maksim A. LITVINOV. Performing calculations, participation in laboratory tests (10 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 16.01.2025, рецензия от первого рецензента получена 27.01.2025, рецензия от второго рецензента получена 03.02.2025, рецензия от третьего рецензента получена 07.02.2025, принята к публикации 03.03.2025.

The article was submitted 16.01.2025, first review received 27.01.2025, second review received 03.02.2025, third review received 07.02.2025, accepted for publication 03.03.2025.