CC BY 4.0

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья
УДК 625.143.4
EDN: https://elibrary.ru/ukphkd
DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-215-226
Научная специальность: 2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Полигонные испытания стыковых накладок шарнирного типа

О. А. Суслов, В. А. Трушкин✉, М. А. Гришина, К. В. Клементьев

Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ),
Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Повреждения рельсов в виде трещин шейки в области стыков и болтовых отверстий преобладают на участках железных дорог с большой грузонапряженностью и суровыми климатическими условиями. Об этом свидетельствует статистика изъятия из эксплуатации остродефектных рельсов по Забайкальской железной дороге. Анализ научных публикаций показал, что с точки зрения повышения надежности преимущество имеет стык с шарнирной конструкцией рельсовых накладок, которая за счет видоизмененного опирания на пазуху рельса снижает напряжения в шейке. Целью работы является подтверждение гипотезы о возможности снижения напряжений в шейке рельса путем использования новой конструкции накладки. Для этого были проведены натурные сравнительные испытания стыка с шарнирной конструкцией и со стандартной клиновидной конструкцией накладки.
Материалы и методы. Для измерения напряженно-деформированного состояния шейки рельса в стыке применен метод тензометрии. Испытания накладок проводились при различных моментах затяжки стыковых болтов. В ходе испытаний сначала регистрировались монтажные напряжения вокруг болтового отверстия, после чего измерялись дополнительные динамические нагрузки, возникающие при прохождении поезда.
Результаты. Полученные результаты показали, что шарнирные накладки снижают монтажные растягивающие напряжения в шейке рельса на 30 % и увеличивают запас усталостной прочности рельсов на 24 % при увеличении момента затяжки стыковых болтов с 600 Нм до 1100 Нм, по сравнению с клиновидной конструкцией. Вертикальные нагрузки мало зависят от затяжки болтов, а напряжения в накладках остаются в безопасных пределах. Мониторинг работы стыка также подтверждает надежность шарнирной конструкции: значения момента затяжки сохраняются на 13 % лучше, при этом дефектов и повреждений накладок и рельсов не было выявлено.
Обсуждение и заключение. Рассмотрены и проанализированы преимущества шарнирной конструкции стыковой накладки. Показано, что она обеспечивает повышенную надежность рельсовых стыков, снижает напряжения в шейке рельса и имеет повышенный запас усталостной прочности. Установлено, что данная конструкция сохраняет более высокую стабильность затяжки болтов в процессе эксплуатации по сравнению с клиновидными накладками. Это позволяет повысить долговечность стыкового соединения, сократить частоту обслуживания и снизить эксплуатационные затраты. Решение особенно эффективно для участков с высокой грузонапряженностью и суровым климатом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рельсовые стыки, шарнирные накладки, стыковые дефекты, усталостная прочность рельсов, момент затяжки болтов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Суслов О. А., Трушкин В. А., Гришина М. А., Клементьев К. В. Полигонные испытания стыковых накладок шарнирного типа // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 3. С. 215–226. DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-215–226.

© Суслов О. А., Трушкин В. А., Гришина М. А., Клементьев К. В., 2025

✉ trushkin.vyacheslav@vniizht.ru (В. А. Трушкин)

CC BY 4.0

TECHNICAL MEANS OF RAILWAY TRANSPORT

Original article
UDK 625.143.4
EDN: https://elibrary.ru/ukphkd
DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-215-226
Scientific specialty: 2.9.2. Railway track, survey and design of railways

Proving ground tests of pin and link fishplates

Oleg A. Suslov, Vyacheslav A. Trushkin✉, Marina A. Grishina, Kirill V. Klementyev

Railway Research Institute,
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Rail damages represented by railhead cracks in the area of joints and bolt holes prevail on railway sections with heavy traffic density and harsh climatic conditions. This is proved by the statistics of withdrawal of severely defective rails on the Trans-Baikal Railway. The analysis of scientific publications shows that in terms of increasing reliability the joint has an advantage with pin and link design of fishplates, which reduces stresses in the rail neck due to the modified support on the rail gorge. The aim of the study is to confirm the hypothesis about the possibility of reducing stresses in the rail neck by using a new fishplate design. In order to confirm the effectiveness of the construction the authors conducted comparative operational tests with wedge-shaped fishplate construction.
Materials and methods. Strain gauge method was used to measure the stress-stain state of the rail neck at the joint. Fishplates were tested at various bolt tightening torques. During tests, the mounting stresses around the bolt hole were recorded first, and additional dynamic loads occurring during the passage of the train were measured after.
Results. The results show that the pin and link fishplates reduce the assembly tension stresses in the rail neck and increase the fatigue strength of the rails with an increase in the tightening torque of the butt bolts compared to the wedge-shaped design. Vertical loads have little effect on bolt tightening, and the stresses in the fishplates remain within safe limits. Joint monitoring also confirms the reliability of the pin and link design: bolt tightening torques decrease over time, but no defects or damage have been detected.
Discussion and conclusion. The advantages of the pin and link design of a fishplate are proposed and discussed. It is shown that it provides increased reliability of rail joints, reduces stresses in the rail neck and has an increased margin of fatigue strength. It was found that this construction retains a higher stability of bolt tightening during operation compared to wedge-shaped fishplates. This increases the durability of the butt joint, reduces the frequency of maintenance, and reduces operating costs. The solution is especially effective for areas with high traffic density and severe climate.

KEYWORDS: rail joints, pin and link fishplates, joint defects, rail fatigue strength, bolt tightening torque

FOR CITATION: Suslov O. A., Trushkin V. A., Grishina M. A., Klementyev K. V. Proving ground tests of pin and link fishplates. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(3):215–226. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21780/2223-9731-2025-84-3-215-226.

✉ trushkin.vyacheslav@vniizht.ru (V. A. Trushkin)

© Suslov O. A., Trushkin V. A., Grishina M. A., Klementyev K. V., 2025

Введение. Трещины, формирующиеся в шейке рельсов в области стыков от болтовых отверстий, которые, как известно, являются неизбежными концентраторами напряжений, соответствуют дефекту 53.1[1], трещины в шейке и в местах перехода к головке от ударов по шейке и других механических повреждений — дефекту 55.1. Рельсы с трещинами считаются остродефектными и подлежат замене без промедления, поскольку представляют прямую угрозу безопасности движения из-за возможного разрушения под поездом или схода колес с рельсов.

Количество дефектов сохраняется на неизменно высоком уровне по статистике изъятий остродефектных рельсов (далее — ОДР) на участках с большой грузонапряженностью и суровыми климатическими условиями. На рис. 1 приведены данные из журнала учета дефектных рельсов, лежащих в главных приемо-отправочных железнодорожных путях (форма ПУ-2а), по количеству изъятых ОДР по трещинам в шейке рельса с болтовыми отверстиями на Забайкальской железной дороге в период 2020–2023 гг. Замены по дефектам 53.1 и 55.1 преобладают, составляя 88–90 % от общего количества изъятых ОДР.

Помимо основных концентраторов напряжений — отверстий в шейке рельса, необходимо отметить воздействие на рельс клиновидной конструкции накладок с применением высокопрочных болтов. Момент затяжки болтов 1100 Нм является целесообразным решением в условиях эксплуатации Восточного полигона [1], однако при использовании стандартной клиновой конструкции стыка вертикальные растягивающие напряжения в шейке рельса в совокупности с постоянной поездной нагрузкой могут приводить к усталостным разрывам по дефектам 53.1 и 55.1. В научной литературе представлены различные способы усиления конструкции стыка [1–10]. К ключевым из них следует отнести упрочнение болтовых отверстий, надлежащее снятие фасок и т. д. Однако некачественное сверление отверстий в условиях дистанций пути и отсутствие необходимых темпов сварки стыков приводит к постоянно высокому количеству стыковых дефектов. В работе [10] были исследованы напряжения в рельсах в зоне стыка, показано снижение напряжений, как и коэффициента асимметрии, по контуру болтового отверстия при соблюдении нормативной затяжки 600 Нм и при своевременном

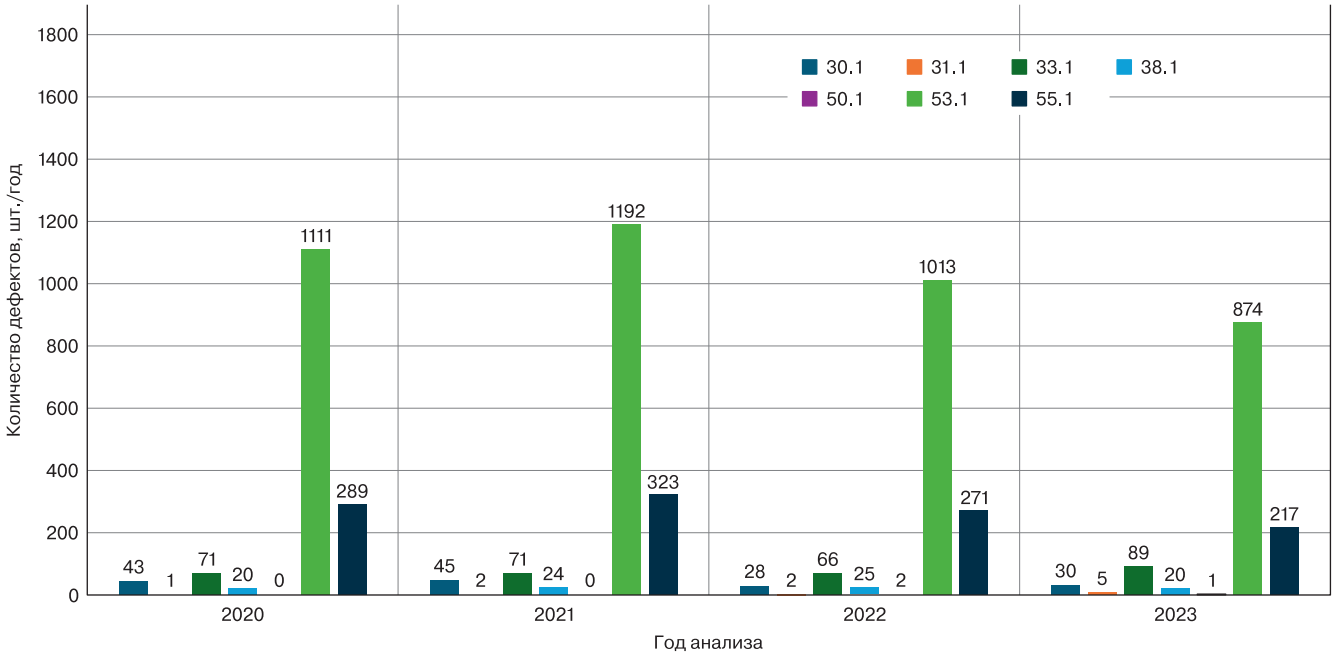

Рис. 1. Количество изъятых остродефектных рельсов на Забайкальской железной дороге*:
30.1, 31.1, 33.1, 38.1, 50.1, 53.1, 55.1 — номера дефектов, характеризующих трещины в шейке рельса
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 1. Number of critical faulty rails on the Trans-Baikal railway*:
30.1, 31.1, 33.1, 38.1, 50.1, 53.1, 55.1 — number of defects, which characterise cracks in the railhead
* Source: compiled by the authors according to the research

[1] Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов. Распоряжение ОАО «РЖД» от 23 октября 2014 г. № 2499р (в ред. от 10 октября 2017 г.). Режим доступа: СПС «КонсультантПлюс» (дата обращения: 07.07.2025).

устранении отступлений от норм содержания в зоне стыков.

В работах В. С. Лысюка[2] и [1, 6] приведена конструкция стыка с накладками шарнирного типа, представленная на рис. 2.

Она устанавливается цилиндрической поверхностью (рис. 2, поз. *2*) в соответствующую ей подголовную выкружку в пазухе рельса (поз. *4*) и при затяжке болтов (поз. *3*) поворачивается относительно шарнира до тех пор, пока нижняя часть накладки плотно не встанет к нижней выкружке шейки рельса (поз. *5*). Таким видом опирания на подголовье рельса можно добиться количественного снижения напряжений в области шейки рельса. В источнике[3] приведены показатели монтажного напряженного состояния шейки рельсов при использовании шарнирной конструкции стыков, измеренные тензометрическим методом, однако не были приведены условия, при которых проводились данные испытания, как и не приводились значения напряжений динамического воздействия от подвижного состава. Таким образом, есть основания предполагать возможность снижения напряжений в шейке рельса на 20–30 % за счет видоизменения опирания новой конструкции накладки на пазуху рельса. Целью данной работы является подтверждение этой гипотезы в условиях обращения современного подвижного состава. Для этого были проведены натурные испытания шарнирной конструкции стыка в сравнении со стандартной.

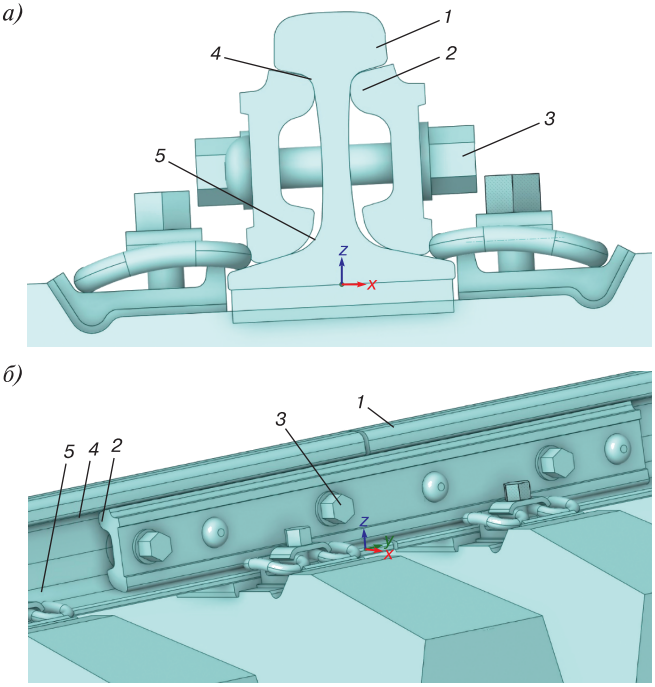

Рис. 2. Внешний вид стыка с накладками шарнирного типа*:
а — вид с торца; *б* — вид сбоку; *1* — рельс; *2* — цилиндрическая поверхность новой накладки; *3* — болты; *4* — подголовная выкружка пазухи рельса; *5* — нижняя выкружка шейки пазухи рельса
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 2. External view of the pin and link fishplates*:
a — end view; *б* — side view; *1* — rail; *2* — cylindrical surface of the new joint bar; *3* — bolts; *4* — head-mounted gorge of seat of fishplate; *5* — lower gorge of seat of fishplate railhead
* Source: compiled by the authors according to the research

Материалы и методы. С целью определения напряженно-деформированного состояния шейки рельса при использовании шарнирной конструкции стыковой накладки были проведены испытания в условиях Экспериментального кольца АО «ВНИИЖТ». Опытный железнодорожный рельсовый стык (рис. 3, поз. *1*) с шарнирными накладками (поз. *3*) был оборудован тензорезисторами (поз. *2*) и стянут с помощью болтов (поз. *4*). Участок располагался на втором кольцевом пути 6 км, пк9 со следующими характеристиками:

- рельсы Р65;
- зазор в стыке 3 мм;
- железобетонные шпалы;
- промежуточное рельсовое скрепление АРС-4;
- высокопрочные стыковые болты;
- щебеночный балласт;
- прямой план и профиль пути.

Испытания проводились при обращении поезда, сформированного из локомотива ВЛ80с и 61 грузового вагона с осевыми нагрузками 23,5 и 25 т/ось. Установленная скорость движения составила 70 км/ч.

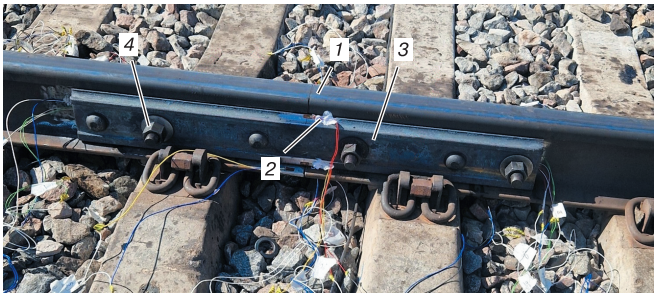

Рис. 3. Внешний вид опытного стыка*:
1 — рельсовый стык; *2* — тензорезистор; *3* — рельсовая накладка; *4* — болт
* Источник: фото авторов

Fig. 3. External view of the experimental joint*:
1 — rail joint; *2* — strain gauge; *3* — fishplate; *4* — bolt
* Source: authors' photo

[2] Лысюк В. С., Сазонов В. Н., Башкатова Л. В. Прочный и надежный железнодорожный путь: производств.-практич. изд. М.: Академкнига, 2003. 589 с.
[3] Там же.

Для оценки влияния момента затяжки двух видов конструкций с помощью электронного динамометрического ключа типа NORGAU серии NTE (модель NTE15-150RR с пределом измерения 1200 Нм) устанавливались моменты затяжки 300, 600 и 1100 Нм.

Усталостные разрывы шейки рельса по дефекту 53.1 проявляются в сечениях под углом 45°[4], поэтому именно эти сечения и были выбраны для измерения напряженно-деформированного состояния под поездной нагрузкой. Для измерений использовались тензорезисторы базой 10 мм, подключенные к аналого-цифровому преобразователю фирмы L-CARD. Частота регистрации записей была установлена 1536 Гц. Внешний вид наклеенных датчиков в области первого болтового отверстия представлен на рис. 4.

При проведении испытаний тензорезисторы для оценки сечений по контуру болтового отверстия были наклеены симметрично с двух сторон рельса (рис. 4, поз. *1–4*). Так же симметрично были наклеены тензорезисторы на расстоянии 10 мм от торца рельса (поз. *5*) и между *2* и *3* болтовыми отверстиями по методике[5] для оценки вертикальных сил в стыке. Для оценки изгибных напряжений в стыковых накладках в сечении по оси стыка резисторы наклеивались по кромкам с наружной стороны в сжатой и растянутой зонах. Схематическое изображение расположения измерительных сечений на рельсе и накладке приведено на рис. 5.

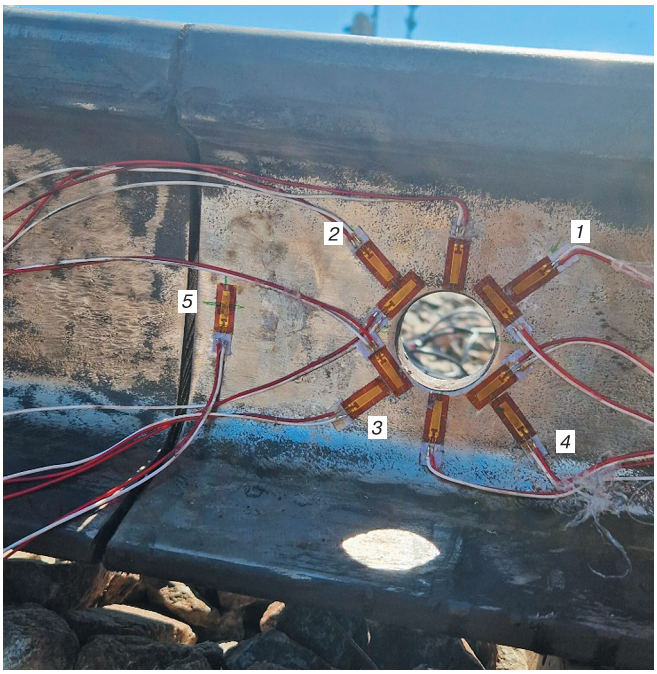

Рис. 4. Внешний вид установленных тензорезисторов у первого болтового отверстия*:
1 — сечение 1; *2* — сечение 2; *3* — сечение 3; *4* — сечение 4;
5 — тензорезистор оценки вертикальных сил
* Источник: фото авторов

Fig. 4. External view of the installed strain gauges at the first bolt hole*:
1 — cross-section 1; *2* — cross-section 2; *3* — cross-section 3;
4 — cross-section 4; *5* — vertical force estimation strain gauge
* Source: authors' photo

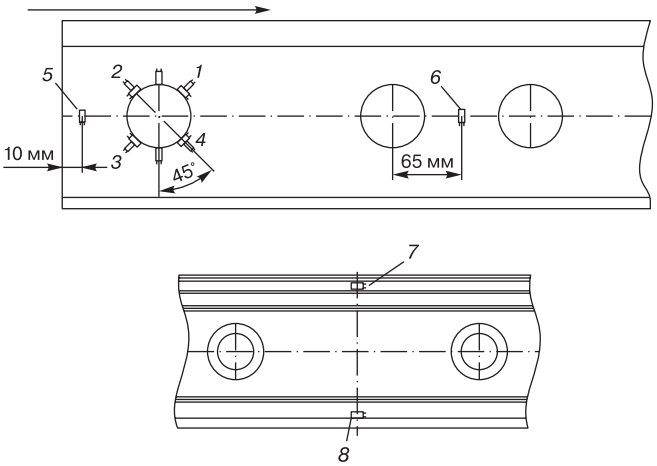

Рис. 5. Схема расположения тензорезисторов для рельса и накладки*:
1 — сечение 1; *2* — сечение 2; *3* — сечение 3; *4* — сечение 4;
5, *6* — тензорезисторы оценки вертикальных сил;
7 — тензорезистор оценки сжатой зоны накладки;
8 — тензорезистор оценки растянутой зоны накладки
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 5. Scheme of the strain gauge placement for rail and fishplate*:
1 — cross-section 1; *2* — cross-section 2; *3* — cross-section 3;
4 — cross-section 4; *5*, *6* — vertical force estimation strain gauges;
7 — strain gauge for estimating fishplate compression zone; *8* — strain gauge for estimating fishplate tension zone
* Source: compiled by the authors according to the research

Для оценки воздействия на стыковой рельс поездной нагрузки сначала были измерены значения монтажных напряжений по контуру болтового отверстия, а затем получены динамические добавки от подвижного состава. Пример записи осциллограмм динамического воздействия от подвижного состава в датчиках по контуру болтового отверстия приведен на рис. 6.

Результаты. Приведенные записи (рис. 6) показывают, что при накатывании колеса на исследуемое сечение в шейке происходит снижение растягивающих монтажных напряжений (сжатие шейки а–) и некоторое их увеличение (растяжение шейки а+) при подходе колеса к сечению и удалению от него. Полученные

[4] Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов.

[5] ГОСТ 34759–2021. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 6 октября 2021 г. № 1068–ст. М.: Стандартинформ, 2021. 28 с.

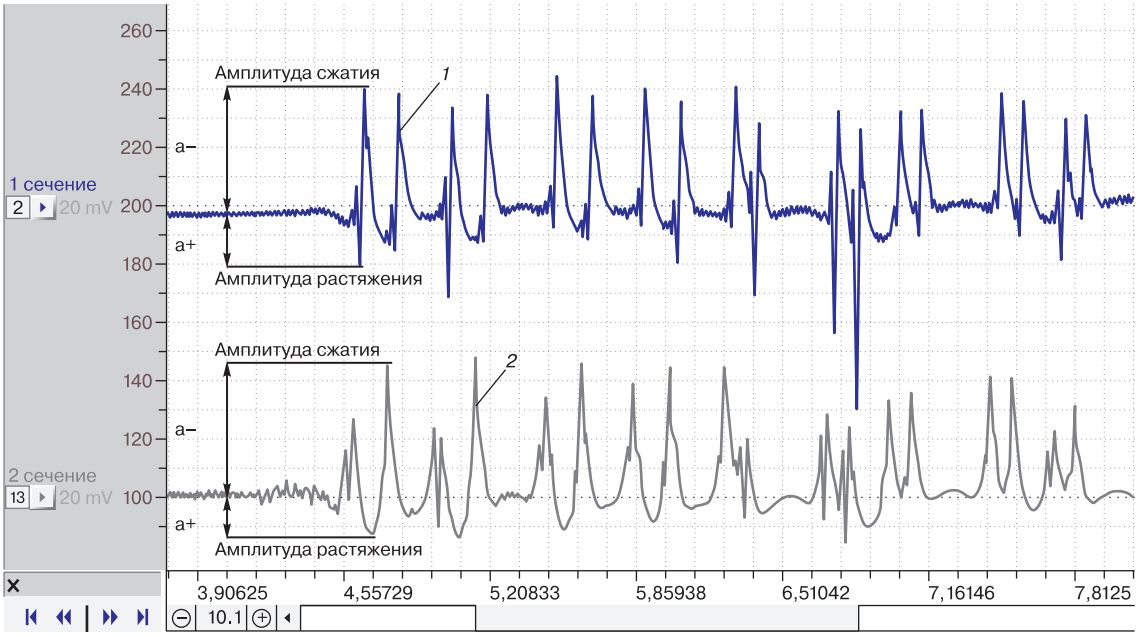

Рис. 6. Пример записи осциллограмм динамических воздействий*:
1 — в сечении 1; *2* — в сечении 2
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 6. Recording example of oscillograms of dynamic effects*:
1 — in cross-section 1; *2* — in cross-section 2
* Source: compiled by the authors according to the research

значения для каждого сечения не имели значимых отличий, поэтому были усреднены по всем сечениям. Значения монтажных напряжений и динамических изменений под поездной нагрузкой по болтовому отверстию в зависимости от затяжки стыковых болтов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения изменения напряжений по болтовому отверстию двух конструкций стыка под нагрузкой*

Table 1

Values of stress changes along the bolt hole of the two joint structures under load*

Крутящий момент на гайках болтов, Мкр, Нм		Монтажные напряжения $\bar{\sigma}_м$, МПа	Динамическое растяжение шейки рельса $\bar{\sigma}_{м+а}$, МПа	Динамическое сжатие шейки рельса $\bar{\sigma}_{м-а}$, МПа
Клиновидные накладки	300	63,4	6,2	31,7
	600	124,3	10,3	28,4
	1100	214,4	15,7	25,8
Шарнирные накладки	300	47,4	3,7	33,4
	600	90,9	7,2	29,1
	1100	171,2	8,8	25,3

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

Как видно из табл. 1, влияние поездной нагрузки на изменение монтажных растягивающих напряжений не столь велико, так как болтовое отверстие находится недалеко от нейтральной оси рельса. Наибольшие средние значения уменьшений напряжений по контуру болтового отверстия составили 33,4 МПа в шарнирных накладках при затяжке болтов 300 Нм. При этом с увеличением момента затяжки стыковых болтов воздействие на рельс линейно уменьшается. В свою очередь, наибольшие напряжения сжатия в клиновидных накладках составили 31,7 МПа. Воздействие сжатия на стыковой рельс у стандартной конструкции несколько меньше, что говорит о специфике работы расклинивающих накладок. Полученные значения сжатия шейки рельса для стандартной конструкции стыка удовлетворительно корреспондируются с результатами ранее выполненных исследований, приведенных в [10].

Однако как значения растяжения металла, так и монтажное напряжение по контуру отверстия меньше для шарнирной конструкции накладок. Это позволяет сделать вывод о верности гипотезы о снижении общего напряженного состояния шейки рельсов в стыковой зоне.

Так как дефекты болтового отверстия имеют усталостную природу возникновения, было решено оценить работу двух конструкций с точки зрения выносливости металла. Как было показано в [11], значение

предела выносливости рельсовых проб с болтовыми отверстиями при симметричном цикле нагружения составляет $\sigma_{-1} = 370$ МПа.

Предел выносливости при произвольном коэффициенте асимметрии цикла σ_r вычисляется следующим способом[6]:

$$\sigma_r = \sigma_{-1}\sqrt{\frac{r}{1-r}}, \quad (1)$$

где r — коэффициент асимметрии цикла напряжений.

В свою очередь прочность шейки в области концов рельсов определяется величиной и знаком максимального и минимального значений напряжений от совместного воздействия монтажной и поездной нагрузок по следующим формулам:

$$\overline{\sigma}_{\max} = \overline{\sigma}_{\text{м}} + \overline{\sigma}_{+\text{а}}; \quad (2)$$

$$\overline{\sigma}_{\min} = \overline{\sigma}_{\text{м}} - \overline{\sigma}_{-\text{а}}. \quad (3)$$

Значение коэффициента асимметрии определяется как

$$r = \frac{\overline{\sigma}_{\min}}{\overline{\sigma}_{\max}}. \quad (4)$$

Значения максимальных напряжений цикла, действующих в шейке рельса, сравниваются с σ_r, по соотношению которых находится запас усталостной прочности:

$$K_{\text{у}} = \overline{\sigma}_r / \overline{\sigma}_{\max}.$$

Полученные расчетные значения коэффициента запаса усталостной прочности рельсов и допускаемого предела выносливости приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты запаса усталостной прочности рельсов и допускаемого предела выносливости*

Table 2

Reserve coefficients of fatigue strength of rails and the permissible endurance limit*

Крутящий момент на гайках болтов Мкр, Нм		Напряжения σ, МПа				
		$\overline{\sigma}_{\max}$	$\overline{\sigma}_{\min}$	Коэффициент асимметрии r	$\overline{\sigma}_r$	$K_{\text{у}}$
Клиновидные накладки	300	69,6	31,7	0,46	338,3855	4,86
	600	134,6	95,9	0,71	582,4458	4,33
	1100	230,1	188,6	0,82	788,7666	3,43
Шарнирные накладки	300	51,1	14,0	0,27	227,2892	4,45
	600	98,1	61,8	0,63	482,7726	4,92
	1100	180,0	145,9	0,81	765,3361	4,25

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

Результаты расчета показывают, что значения коэффициента запаса по усталости $K_{\text{у}}$ во всех случаях больше 2,0. Однако у шарнирных накладок запасы выше при работе в условиях затяжки стыковых болтов 600 Нм и 1100 Нм.

Силовое воздействие на путь в зоне стыка. В предыдущем разделе уже приведены замеры напряжений в зоне болтовых отверстий при нагрузке от подвижного состава и затяжки стыковых болтов. Также были измерены значения вертикальных сил от воздействия подвижного состава на стык. Тарировка измерительных каналов производилась на скорости движения поезда 5 км/ч, после чего записывались полноценные проезды для трех моментов затяжки болтов. В табл. 3 и 4 приведены значения полученных вертикальных сил в зависимости от момента затяжки для двух различных сечений рельса.

Таблица 3

Значения вертикальных сил в зависимости от момента затяжки на расстоянии 10 мм от торца принимающего рельса*

Table 3

Values of vertical forces depending on the tightening torque at a distance of 10 mm from the end of the receiving rail*

Крутящий момент на гайках болтов Мкр, Нм		Вертикальная сила, кН	
		Среднее	СКО
Клиновидные накладки	300	126,4	2,74
	600	123,1	2,34
	1100	121,2	2,18
Шарнирные накладки	300	128,7	3,89
	600	123,8	3,12
	1100	120,6	2,75

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

Таблица 4

Значения вертикальных сил в зависимости от момента затяжки между 2 и 3 болтовыми отверстиями рельсового стыка*

Table 4

Values of vertical forces depending on the tightening torque between bolt holes 2 and 3 of the rail joint*

Крутящий момент на гайках болтов Мкр, Нм		Вертикальная сила, кН	
		Среднее	СКО
Клиновидные накладки	300	123,0	2,39
	600	122,6	2,12
	1100	121,5	2,32
Шарнирные накладки	300	126,7	3,56
	600	124,3	2,48
	1100	123,0	2,38

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

[6] Гоц А. Н. Расчеты на прочность деталей ДВС при напряжениях, переменных во времени: учеб. пособие. Владимир: ВлГУ, 2005. 117 с.

На основании полученных значений можно сказать, что в условиях маленького стыкового зазора (3 мм) значения вертикальных сил при различных затяжках не имеют больших различий. Однако важно отметить, что имеется некоторое увеличение сил в сечении ближе к торцу рельса по сравнению с сечением между 2 и 3 болтовыми отверстиями.

Измерение напряжений в стыковых накладках. Для оценки прочности накладок при применении высокопрочных болтов и новой конструкции был найден фактический уровень нормальных напряжений в сечении по оси стыка для двух конструкций. Осциллограмма напряжений в накладках в сжатой и растянутой зоне приведена на рис. 7.

Значения напряжений в сжатой и растянутой зонах с расчетными максимально вероятными значениями при нормальном законе распределения случайной величины для $\Phi = 0{,}994$ приведены на рис. 8 и 9 соответственно.

Из рисунков 8 и 9 видно, что напряжение в накладках невелико и не достигает пределов текучести материала накладок (сталь К54). Увеличение напряжений наблюдается при росте величины момента затяжки стыковых болтов. Однако для безопасной работы накладок также важно учитывать температурное воздействие, так как должно быть выполнено условие прочности:

$$\sigma_t + \sigma_н \leqslant [\sigma_Т]; \qquad (5)$$

где σ_t — температурные напряжения в накладках;

$\sigma_н$ — напряжения в накладках от воздействия поездных вертикальных сил;

$[\sigma_Т]$ — предел текучести стали стыковых накладок.

Исходя из наибольшей величины стыкового сопротивления шестиболтового рельсового стыка при моменте затяжки $M_{кр} = 1100$ Нм, $P_н = 800$ кН. Тогда максимально возможные температурные напряжения в стыковых накладках составят:

$$\sigma_t = \frac{P_н}{2F} = \frac{800 \cdot 10^3 \text{ Н}}{72{,}14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2} = 110{,}8 \text{ МПа}, \qquad (6)$$

где F — площадь поперечного сечения профиля шарнирной накладки (согласно разработанной конструкторской документации $F = 36{,}07 \cdot 10^{-4}$ м^2).

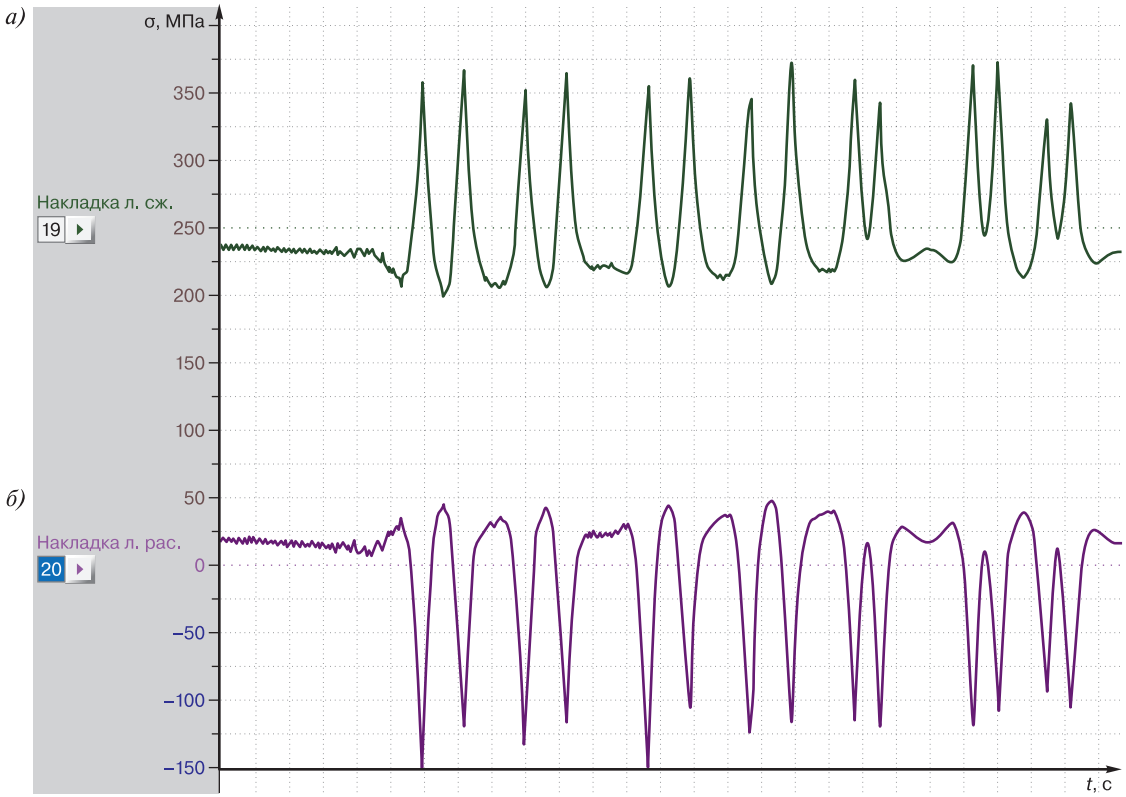

Рис. 7. Пример записи осциллограммы напряжений в накладках*:
а — в сжатой зоне; *б* — в растянутой зоне
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 7. Recording example of oscillograms of stresses in the fishplates*:
a — in the compressed zone; *б* — in the tension zone
* Source: compiled by the authors according to the research

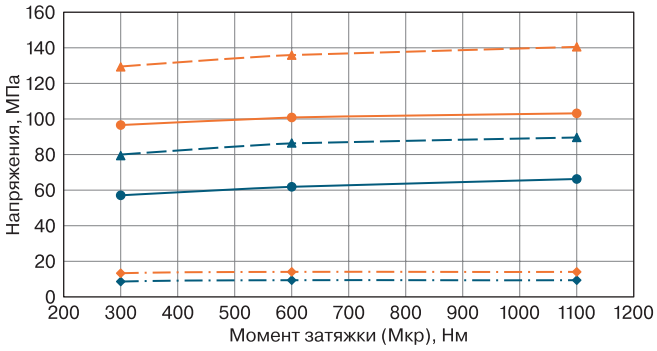

Рис. 8. Зависимость полученных напряжений от момента затяжки болтов в сжатой зоне*:
— клиновидные накладки; — клиновидные максимальные вероятности; — СКО клиновидные; — шарнирные накладки; — шарнирные максимальные вероятности; — СКО шарнирные
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 8. Dependence of the received stresses on the bolts tightening torque in the compressed zone*:
— wedge-shaped fishplates; — wedge-shaped maximum probabilities; — wedge-shaped standard deviations; — pin and link fishplates; — pin and link maximum probabilities; — pin and link standard deviations
* Source: compiled by the authors according to the research

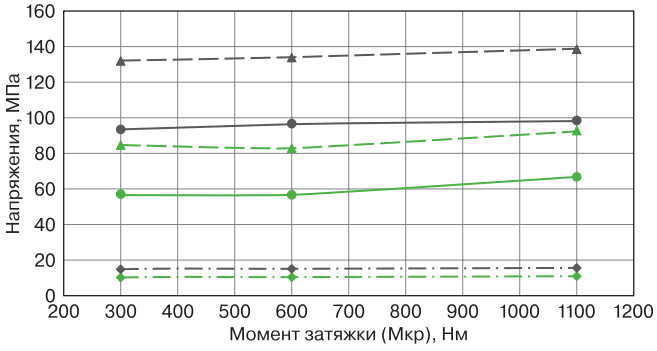

Рис. 9. Зависимость полученных напряжений от момента затяжки болтов в растянутой зоне*:
— клиновидные накладки; — клиновидные максимальные вероятности; — СКО клиновидные; — шарнирные накладки; — шарнирные максимальные вероятности; — СКО шарнирные
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 9. Dependence of the received stresses on the bolts tightening torque in the tension zone*:
— wedge-shaped fishplates; — wedge-shaped maximum probabilities; — wedge-shaped standard deviations; — pin and link fishplates; — pin and link maximum probabilities; — pin and link standard deviations
* Source: compiled by the authors according to the research

В соответствии с ГОСТ 33184–2014[7] накладки для рельсовых стыков изготавливают из термоупрочненной стали с пределом текучести $[\sigma_T] = 530$ МПа.

Суммируя температурные напряжения в накладках с максимальными вероятными значениями изгибных напряжений, возникающих под поездной нагрузкой, получим:

$$\sigma_t + \sigma_н = 110{,}8 + 138{,}6 = 249{,}4 \text{ МПа}. \quad (7)$$

Иными словами, прочность шарнирных стыковых накладок надежно обеспечивается с двойным запасом относительно предела текучести и не лимитируется применением затяжки 1100 Нм.

Натурные наблюдения за работой конструкций при эксплуатации. Помимо тензометрических испытаний были проведены эксплуатационные наблюдения за работой рельсовых стыков. Были отобраны участки второго кольцевого пути с характеристиками, приведенными в табл. 5.

Мониторинг раскручивания гаек стыковых болтов проводился после пропуска 15, 30, 50, 70, 100 млн т брутто на опытных и контрольных участках пути. На каждом опытном участке были установлены моменты затяжки 600 Нм для каждого болта обоих видов конструкций. Измерения проводились по каждому болту отдельно с помощью электронного динамометрического ключа типа NORGAU серии NTE (модель NTE15-150RR с пределом измерений 1200 Нм). Обработка полученных значений усреднялась для каждого болта по отдельности. На рис. 10 приведена рассматриваемая схема номеров отверстий, по которым усреднялись данные.

На рис. 11 и 12 приведены графики изменения средних величин $M_{кр}$ в зависимости от пропущенного тоннажа. Также в табл. 6 приведены полученные уравнения аппроксимации для каждого болта.

Таблица 5

Характеристики участков*

Table 5

Sections characteristics*

Расположение	Вид стыков	План	Профиль	Скрепления
2 путь, 3 км, пк 1–2	Шарнирные стыки	Прямой участок, участок с $R = 550$ м	1,2 ‰, 0 ‰	АРС, ЖБР-65
2 путь, 3 км, пк 4–5	Клиновидные стыки	Прямой участок, участок с $R = 550$ м	2,2 ‰, 0,8 ‰	ЖБР-65, АРС

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

[7] ГОСТ 33184–2014. Накладки рельсовые двухголовые для железных дорог широкой колеи. Технические условия: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 февраля 2015 г. № 91–ст. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.

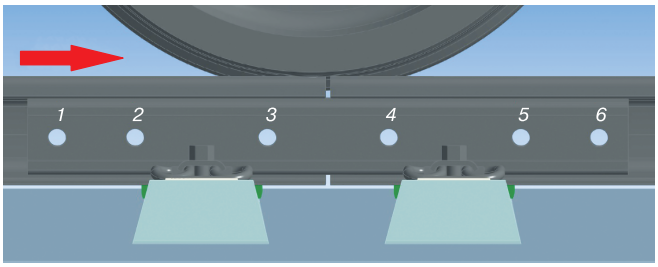

Рис. 10. Схема номеров отверстий*:
1, *2*, *3* — отверстия у отдающего рельса; *4*, *5*, *6* — отверстия у принимающего рельса
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 10. Holes numbers scheme*:
1, *2*, *3* — sending rail holes; *4*, *5*, *6* — receiving rail holes
* Source: compiled by the authors according to the research

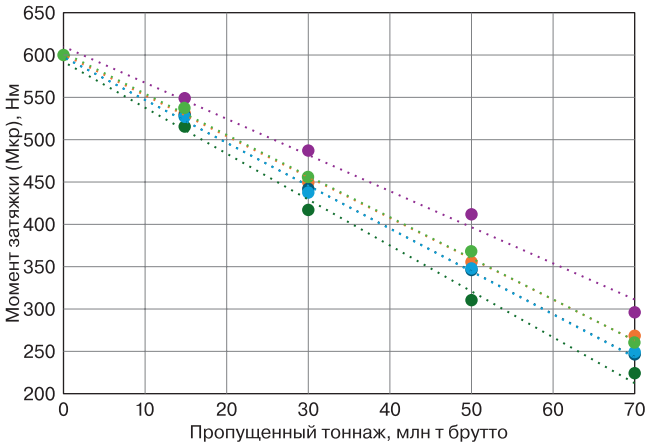

Рис. 11. Изменение моментов затяжки гаек болтов с клиновидной конструкцией стыка*:
● — болт 1; ● — болт 2; ● — болт 3;
● — болт 4; ● — болт 5; ● — болт 6;
····· — линейная (болт 1); ····· — линейная (болт 2);
····· — линейная (болт 3); ····· — линейная (болт 4);
····· — линейная (болт 5); ····· — линейная (болт 6)
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 11. Change of bolt nuts tightening torques with wedge-shaped joint design*:
● — bolt 1; ● — bolt 2; ● — bolt 3;
● — bolt 4; ● — bolt 5; ● — bolt 6;
····· — linear (bolt 1); ····· — linear (bolt 2);
····· — linear (bolt 3); ····· — linear (bolt 4);
····· — linear (bolt 5); ····· — linear (bolt 6)
* Source: compiled by the authors according to the research

Из представленных графиков видно, как линейно уменьшается величина $M_{кр}$ затянутых болтов. Полученные значения снижения моментов затяжки явно коррелируют со значениями, полученными в исследовании [1]. При этом отмечено, что падение затяжки неравномерно по длине накладки, а наиболее интенсивное падение затяжки наблюдается у торцевых болтов. Объясняется это ударно-вибрационным воздействием колес на торец рельса. Также после пропуска

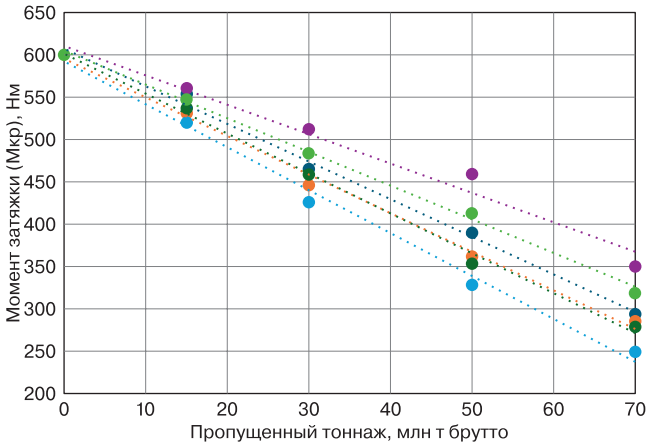

Рис. 12. Изменение моментов затяжки гаек болтов с шарнирной конструкцией стыка*:
● — болт 1; ● — болт 2; ● — болт 3;
● — болт 4; ● — болт 5; ● — болт 6;
····· — линейная (болт 1); ····· — линейная (болт 2);
····· — линейная (болт 3); ····· — линейная (болт 4);
····· — линейная (болт 5); ····· — линейная (болт 6)
* Источник: составлено авторами по материалам исследования

Fig. 12. Change of bolt nuts tightening torques with hinged joint design*:
● — bolt 1; ● — bolt 2; ● — bolt 3;
● — bolt 4; ● — bolt 5; ● — bolt 6;
····· — linear (bolt 1); ····· — linear (bolt 2);
····· — linear (bolt 3); ····· — linear (bolt 4);
····· — linear (bolt 5); ····· — linear (bolt 6)
* Source: compiled by the authors according to the research

Таблица 6

Уравнения аппроксимации снижения затяжки стыковых болтов*

Table 6

Approximation equations for reducing butt bolts tightening torque*

Номер болта		Уравнение аппроксимации
Клиновидные накладки	1	$y = -5{,}0758x + 599{,}17$
	2	$y = -4{,}8203x + 601{,}07$
	3	$y = -5{,}4324x + 593{,}6$
	4	$y = -5{,}0576x + 597{,}9$
	5	$y = -4{,}2806x + 610{,}66$
	6	$y = -4{,}8609x + 604{,}08$
Шарнирные накладки	1	$y = -4{,}4286x + 607{,}14$
	2	$y = -4{,}5588x + 595{,}69$
	3	$y = -4{,}7027x + 601{,}35$
	4	$y = -5{,}0805x + 592{,}86$
	5	$y = -3{,}4659x + 611{,}04$
	6	$y = -3{,}9738x + 604{,}3$

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

70 млн т брутто измерения проводились после плановой осенней и весенней подтяжки болтов, поэтому не были включены в график.

Осмотр самих участков с двумя конструкциями за время наработки тоннажа не выявил дефектов или изломов рельсовых стыковых накладок и рельсов, что также подтверждает надежность работы стыковых накладок шарнирного типа и стыков, собранных с использованием таких накладок.

Обсуждение и заключение. Проведенные испытания и анализ полученных данных показывают, что применение шарнирной конструкции стыковой накладки обеспечивает высокий уровень надежности рельсовых стыков.

Значения монтажных напряжений в шейке рельса меньше на 30 % при использовании шарнирной конструкции стыка.

Воздействие подвижного состава при нормативных моментах затяжки стыковых болтов показывает практически идентичные результаты амплитудных напряжений сжатия по контуру болтового отверстия для двух конструкций. При этом амплитуды растяжения шейки меньше у шарнирной конструкции.

Расчетный коэффициент запаса по усталостной прочности по контуру болтового отверстия для новой конструкции выше при моменте затяжки 1100 Нм на 24 %, а при 600 Нм — на 14 %. Это подтверждает повышение живучести рельсов в отношении образования дефектов 53.1 и 55.1.

Силовое воздействие от вертикальных нагрузок на принимающий конец рельса не имеет заметных различий для моментов затяжки болтов даже при сравнении с нагрузками в сечениях между 2 и 3 болтовыми отверстиями.

Установлено, что прочность шарнирных накладок с моментом затяжки 1100 Нм надежно обеспечивается практически с двукратным запасом относительно предела текучести стали.

Проведенный анализ показателей затяжки болтов при эксплуатации демонстрирует преимущества использования стыковых накладок шарнирного типа. При достижении наработки в 70 млн т брутто данный тип соединения в среднем сохраняет на 13 % более высокие значения момента затяжки по сравнению с клиновидными накладками. Такое техническое решение обеспечивает:

- повышенную стабильность стыкового сопротивления в процессе эксплуатации;
- возможность снижения частоты плановых протяжек стыковых болтов.

Полученные данные свидетельствуют о значительном эксплуатационном потенциале шарнирных накладок, особенно на участках с высокой грузонапряженностью, где требования к надежности стыковых соединений особенно критичны.

Для оценки эффективности предложенной конструкции целесообразно продолжить исследования работы в условиях действующих грузонапряженных линий со сложными климатическими условиями и различным планом и профилем пути. Это позволит оценить такие параметры, как:

- интенсивность накопления просадок рельсов в зонах стыков;
- сопротивление продольному сдвигу рельсов относительно накладок;
- устойчивость рельсовой нити в плане в зоне стыка при повышении температуры рельсов.

Кроме этого, для более полной оценки напряженно-деформированного состояния стыков необходимо провести исследования при различной величине зазора и различной скорости движения подвижного состава методом математического моделирования и/или методом натурных испытаний с тензометрическим измерением напряжений.

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. Клинов С. И., Кондратьев А. А. Высокопрочные болты // Путь и путевое хозяйство. 1988. № 1. С. 33–35.

Klinov S. I., Kondratyev A. A. High strength bolts. *Railway Track and Facilities.* 1988;(1):33–35. (In Russ.).

2. Виногоров Н. П., Клементьев К. В. Как повысить надежность стыка: возможные варианты // Путь и путевое хозяйство. 2021. № 5. С. 21–24. EDN: https://elibrary.ru/lkkoci.

Vinogorov N. P., Klementyev K. V. Refinement rail joint: problem solution options. *Railway Track and Facilities.* 2021;(5):21–24. (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/lkkoci.

3. Шур Е. А. Повреждения рельсов. М.: Интекст, 2012. 192 с. EDN: https://elibrary.ru/qnysej.

Shur Ye. A. Rails damage. Moscow: Intext, 2012. 192 p. (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/qnysej.

4. Шур Е. А., Чурюмова И. А., Бейзеров М. С., Зайцев И. Ф. Влияние качества изготовления болтовых отверстий на надежность железнодорожных рельсов в зоне стыка // Повышение эффективности и надежности работы рельсов. Сер. «Труды ВНИИЖТ». М.: Транспорт, 1990. С. 80–89. EDN: https://elibrary.ru/vgavhj.

Shur Ye. A., Churyumova I. A., Beyzerov M. S., Zaytsev I. F. The influence of the quality of bolt holes on the reliability of railway rails in the joint zone. *Increasing the efficiency and reliability of rail operation. Works of VNIIZHT Series.* Moscow: Transport, 1990. P. 80–89. (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/vgavhj.

5. Певзнер В. О., Железнов М. М., Каплин В. Н., Третьяков В. В., Мысливец М. Н., Томиленко А. С. Повышение стабильности пути в зоне стыков за счет применения упругих подшпальных прокладок // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2016. Т. 75, № 3. С. 140–146. EDN: https://elibrary.ru/wbkdqr.

Pevzner V. O., Zheleznov M. M., Kaplin V. N., Tretyakov V. V., Myslivets M. N., Tomilenko A. S. Increasing track stability in the zone of joints due to the use of elastic under sleeper pads. *Russian Railway Science Journal*. 2016;75(3):140–146. (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/wbkdqr.

6. Лысюк В. С. Управление надежностью бесстыкового пути интенсивными методами // Управление надежностью железнодорожного пути. М.: Транспорт, 1991. С. 24–41.

Lysyuk V. S. Intensive methods for managing the reliability of continuous welded rails. *Railroad Reliability Management*. Moscow: Transport, 1991. P. 24–41. (In Russ.).

7. Малявин Д. А., Клементьев К. В. Проблема роста количества мест временного восстановления рельсовых плетей // Путь и путевое хозяйство. 2024. № 8. С. 18–21. EDN: https://elibrary.ru/kxlmls.

Malyavin D. A., Klementyev K. V. The problem of growth in the number of places for temporary rehabilitation of rail tracks. *Railway Track and Facilities*. 2024;(8):18–21. (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/kxlmls.

8. Maximov J. T., Duncheva G. V. A new approach to enhancement of fatigue life of rail-end-bolt holes. *Engineering Failure Analysis*. 2013;29:167–179. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2012.12.001.

9. Mayville R. A., Hilton P. D. Fracture mechanics analysis of a rail-end bolt hole crack. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 1984;1(1):51–60. https://doi.org/10.1016/0167-8442(84)90020-X.

10. Крысанов Л. Г., Клокова О. О. Напряжения в рельсах в зоне стыка // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 1986. № 1. С. 50–52.

Krysanov L. G., Klokova O. O. Stresses in the rails at the joint area. *Russian Railway Science Journal*. 1986;(1):50–52. (In Russ.).

11. Борц А. И., Рейхарт В. А., Суслов О. Н., Дубинский С. И. Оценка ресурса рельсов с болтовыми отверстиями // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 3. С. 24–32. EDN: https://elibrary.ru/ytisuo.

Borts A. I., Reykhart V. A., Suslov O. N., Dubinskiy S. I. Estimation of the service life of rails with bolt holes. *Railway Track and Facilities*. 2018;(3):24–32. (In Russ.). EDN: https://elibrary.ru/ytisuo.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Олег Александрович СУСЛОВ,
д-р техн. наук, главный научный сотрудник,
научный центр «Инфраструктура»,
Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва,
ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), Author ID: 445985,
https://orcid.org/0000-0001-5466-5479

Вячеслав Анатольевич ТРУШКИН,
ведущий инженер, научный центр «Инфраструктура»,
Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва,
ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), Author ID: 1292760,
https://orcid.org/0009-0000-3646-282X

Марина Александровна ГРИШИНА,
ведущий инженер, научный центр «Инфраструктура»,
Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва,
ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), Author ID: 1274954,
https://orcid.org/0009-0002-5962-7273

Кирилл Владимирович КЛЕМЕНТЬЕВ,
канд. техн. наук, научный консультант,
научный центр «Инфраструктура»,
Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ, 129626, г. Москва,
ул. 3-я Мытищинская, д. 10, стр. 1), Author ID: 853263,
https://orcid.org/0009-0004-4556-2450

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Oleg A. SUSLOV,
Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Infrastructure Science Centre,
Railway Research Institute (129626, Moscow,
bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 445985,
https://orcid.org/0000-0001-5466-5479

Vyacheslav A. TRUSHKIN,
Leading Engineer, Infrastructure Science Centre,
Railway Research Institute (129626, Moscow, bldg.
1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1292760,
https://orcid.org/0009-0000-3646-282X

Marina A. GRISHINA,
Leading Engineer, Infrastructure Science Centre,
Railway Research Institute (129626, Moscow,
bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 1274954,
https://orcid.org/0009-0002-5962-7273

Kirill V. KLEMENTYEV,
Cand. Sci. (Eng.), Scientific Advisor, Infrastructure Science Centre,
Railway Research Institute (129626, Moscow,
bldg. 1, 10, 3rd Mytishchinskaya St.), Author ID: 853263,
https://orcid.org/0009-0004-4556-2450

ВКЛАД АВТОРОВ

Олег Александрович СУСЛОВ. Обоснование направления исследования, формулировка цели и задач. Формирование выводов и предложений (20 %).

Вячеслав Анатольевич ТРУШКИН. Подготовка и проведение испытаний. Написание текста статьи. Анализ полученных данных (50 %).

Марина Александровна ГРИШИНА. Расчет зависимостей и обработка результатов испытаний (20 %).

Кирилл Владимирович КЛЕМЕНТЬЕВ. Обзор основных направлений исследования, сбор и структурирование методики проведения испытаний (10 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Oleg A. SUSLOV. Substantiation of the research direction, formulation of goals and objectives. Drawing conclusions and suggestions (20 %).

Vyacheslav A. TRUSHKIN. Tests preparation and handling. Article writing. Analysis of the obtained data (50 %).

Marina A. GRISHINA. Calculation of dependencies and test results processing (20 %).

Kirill V. KLEMENTYEV. Review of the main research directions, collection and structuring of test handling methods (10 %).

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

Статья поступила в редакцию 01.08.2025, рецензия от первого рецензента получена 04.08.2025, рецензия от второго рецензента получена 02.09.2025, принята к публикации 02.09.2025.

The article was submitted 01.08.2025, first review received 04.08.2025, second review received 02.09.2025, accepted for publication 02.09.2025.