

**В. А. Трушкин<sup>1</sup>, К. В. Клементьев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва, Российская Федерация

## **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ В ЗОНЕ СТЫКА**

**Аннотация.** На данный момент в Российской Федерации остро стоит вопрос повышения провозной способности железнодорожных линий. В связи с этим, количество поездов повышенной массы, и грузонапряженность неустанно растет. Такой рост, несомненно, приводит к дефектности и отказам рельсов как в середине, так и на концах плетей бесстыкового пути. И если дефект возникает в середине плети, то на этом месте необходимо устройство места временного восстановления плети. А одним из самых опасных отказов рельсов являются изломы в стыках, из-за невозможности своевременного обнаружения дефектоскопными тележками. Особенно большое количество этих изломов заметно на Восточном полигоне, где постоянно поддерживается высокий уровень изъятий острodefектных болтовых рельсов по коду 53.1. В статье рассмотрены перспективное решение по повышению надежности в зоне болтового рельсового стыка с применением новой конструкции стыковой накладки. Проведено, методом математического моделирования, исследование напряженного-деформированного состояния болтового отверстия на конце рельса, при применении двух различных конструкций стыков. После чего приведены верификационные тензометрические испытания шейки рельсов и стыковых болтов, подтверждающие точность разработанной математической модели.

**Ключевые слова:** бесстыковой путь, рельсовый стык, шарнирные накладки, дефект рельса, стыковой болт.

**V. A. Trushkin<sup>1</sup>, K. V. Klementiev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Railway Research Institute of JSC Russian Railways, Moscow, the Russian Federation

## **ENHANCING RAILWAY TRACK RELIABILITY AT THE JOINT AREA**

**Abstract.** Currently, in the Russian Federation, increasing the carrying capacity of railway lines is a critical issue. Consequently, the number of higher-mass trains and freight density are steadily increasing. This growth inevitably leads to defects and failures of rails, both in the mid-span and at the ends of continuous welded rails (CWR). If a defect occurs in the mid-span of a CWR section, a temporary rail repair site must be established at that location. Furthermore, one of the most hazardous rail failures is fracture at the bolted joints, due to the difficulty in timely detection by flaw detection trolleys. A particularly high incidence of these fractures is observed on the Eastern Operating Domain, where a consistently high rate of acutely defective bolted rails are removed according to pattern 53.1. This article examines a promising solution for enhancing reliability in the bolted rail joint area through the application of a novel joint bar (fishplate) design. A mathematical modeling investigation of the stress-strain state around the bolt hole at the rail end was conducted, comparing two different joint configurations. Subsequently, verification strain gauge testing of the rail web and joint bolts was performed, confirming the accuracy of the developed mathematical model.

**Keywords:** Continuous Welded Rail (CWR), Rail joint, Hinged fishplates, Rail defect, Joint bolt

### **Введение**

Сегодня на железных дорогах РФ существует ряд сложных проблем, связанных с эксплуатацией конструкции пути. И если избежать возможных отказов пути невозможно на данный момент, то следует стремиться к их снижению. Опаснейшими отказами пути являются изломы рельсов, образующиеся при развитии трещин в рельсах. В данной работе хотелось бы рассмотреть дефекты, образующиеся в болтовых стыках. Поскольку большинство таких дефектов может вызвать сход подвижного состава с тяжелыми последствиями. При этом самым опасным, с точки зрения риска схода, можно считать дефект 53.1, ввиду невозможности своевременного обнаружения дефектоскопными тележками при хрупком изломе.

Дефекты, рельсов наглядно проиллюстрированы и приведены в инструкции дефектов 2499/р от 23.10.2014 г. [1]. Дефект по коду 53.1, исходя из этого документа, является острodefектным (далее-ОДР), и требует незамедлительных мер по его устранению.

Для оценки количества дефектов были отобраны статистические показатели по трем дорогам Восточного полигона, как самых грузонапряженных, и как следствие, наиболее уязвимых для появления ОДР. Статистические показатели по числу изъятых ОДР за год в болтовых стыках приведены на рис. 1–3.

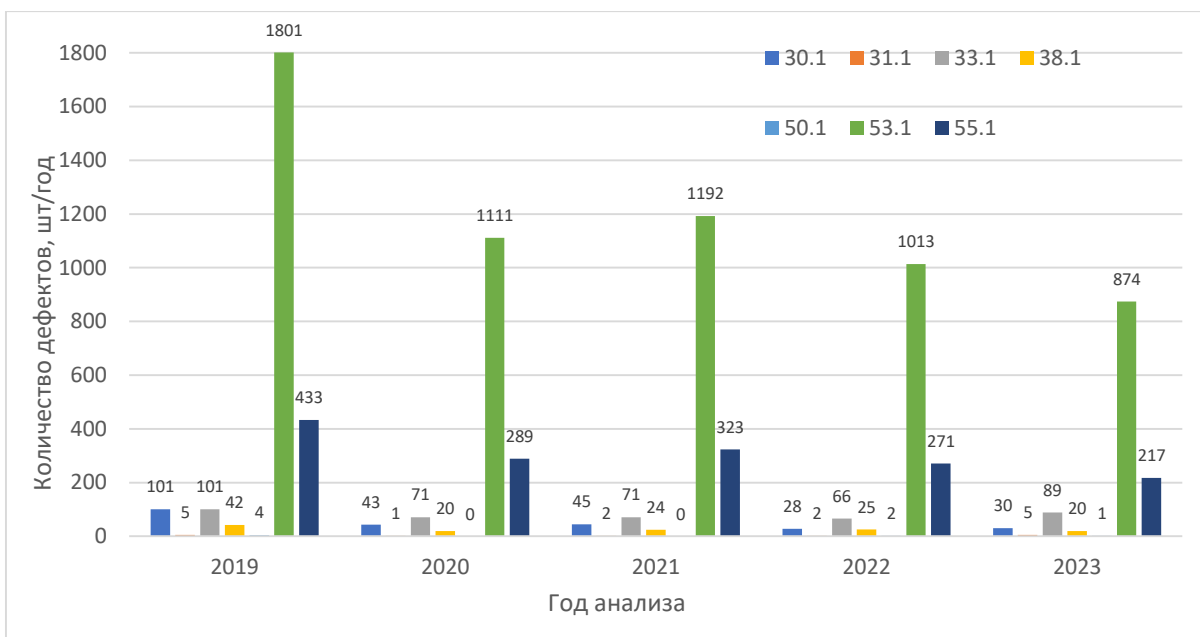


Рис. 1. Количество изъятых ОДР на Забайкальской ДИ

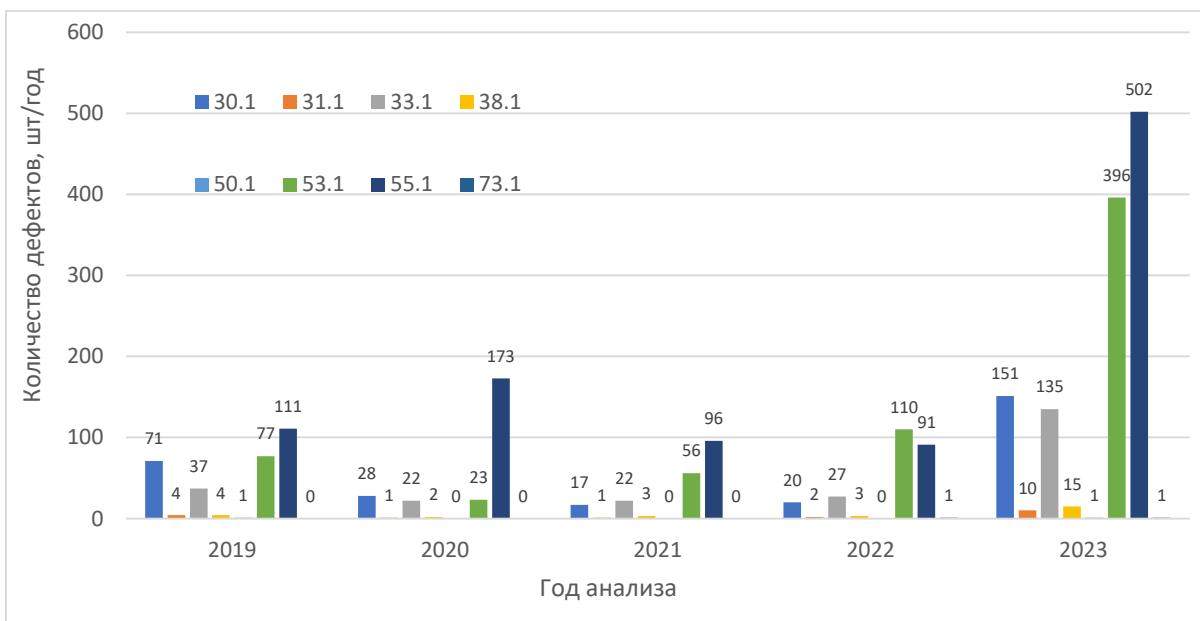
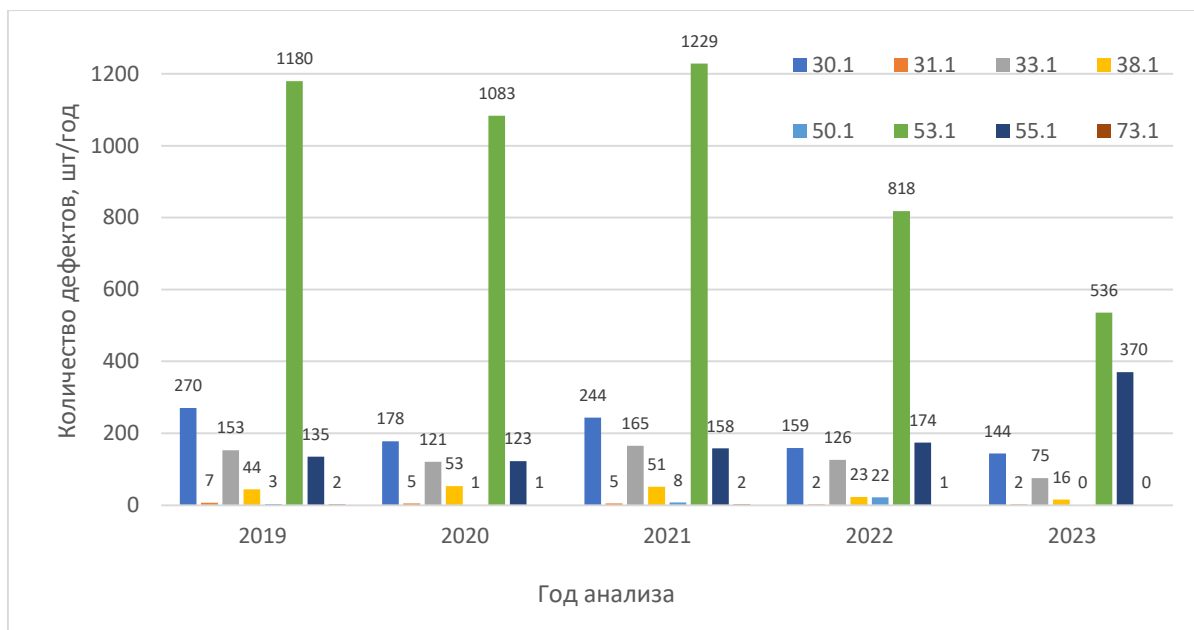


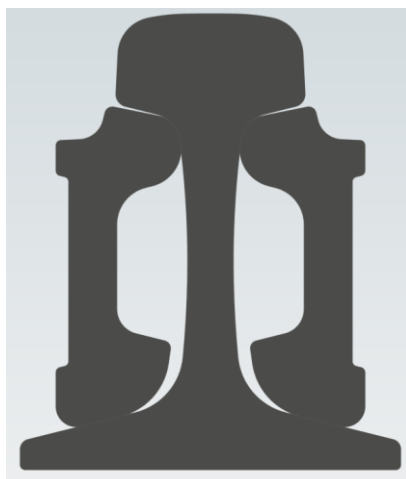
Рис. 2. Количество изъятых ОДР на Восточно-Сибирской ДИ



**Рис. 3. Количество изъятых ОДР на Дальневосточной ДИ**

Как видно из статистики отказов по дефектам болтовых стыков, ежегодно число изъятых ОДР по коду 53.1 имеет крайне высокий показатель по сравнению с другими рассматриваемыми кодами. И очевидно, что темпы сварки на разных дорогах, неравномерно поспевают за постоянно растущим количеством мест временного восстановления плетей (далее—МВВП), из-за которого, в частности, и образуются постоянные изъятия рельсов по коду 53.1 [2,3].

Для борьбы с данным дефектом существует множество мер. Поскольку сами изломы образуются из-за контактной усталости металла при работе под поездом, к основным видам борьбы можно причислить: упрочнение отверстий, надлежащее снятие фасок при изготовлении болтовых отверстий, переход на рельсы с большей толщиной шейки, повсеместное применение высокопрочных болтов и т.д. [4-12]. Однако, как было доказано в исследованиях [4,5,9,12], монтажная затяжка болтов, особенно с моментом кручения равным 1100 Нм, вызывает большие растягивающие (монтажные) напряжения в шейке рельса. Монтажные напряжения в несколько раз превышают те, что возникают при проходе подвижного состава. И, несомненно, такие нагрузки от монтажного воздействия накладок ведут к более сложному напряженному состоянию стыка. Одним из возможных решений по снижению механических напряжений в зоне шейки рельса является применение конструкции шарнирного опирания накладок. Внешний вид данной конструкции приведен на рис. 4.



**Рис. 4. Конструкция стыка с шарнирными накладками**

Её применение позволяет эффективно перераспределять напряжения не только в вертикальной плоскости, но и в горизонтальной, как было показано в исследовании [12].

### Оценка напряженно-деформированного состояния конструкций стыков на основе математического моделирования

Для того, чтобы оценить напряженное состояние шейки рельса и первого болтового отверстия для двух конструкций стыка был выполнен расчет рельсового стыка на трехточечный изгиб в среде конечно-элементного моделирования (далее-КЭМ). Усилие затяжки стыковых болтов задавалось с помощью пред-напряженного состояния болтов. Осевые усилия ( $Q$ , Н), возникающие при закручивании гаек, были найдены посредством известной расчетной формулы [13], связывающей параметры  $Q$  и  $M_{кр}$  для болтов М27:

$$Q = \frac{2\pi M_{кр}}{h + \pi\mu(d + D)}, \quad (1)$$

где:

$h$ -шаг резьбы,мм;

$d$ -средний диаметр круга трения в резьбе, мм;

$D$ -средний диаметр круга трения опорной поверхности гайки, мм;

$M_{кр}$ -момент затяжки болта, Нм;

$\mu$  – коэффициент трения стали.

Нагружение стыков происходило по схеме трехточечного изгиба согласно ГОСТ 33185–2014 [14] с одновременной оценкой вертикальных прогибов конструкции. Моделирование выполнялось с помощью метода конечных элементов. Внешний вид модели с рассчитанным напряженно-деформированным состоянием в области первого болтового отверстия представлен на рис. 5.

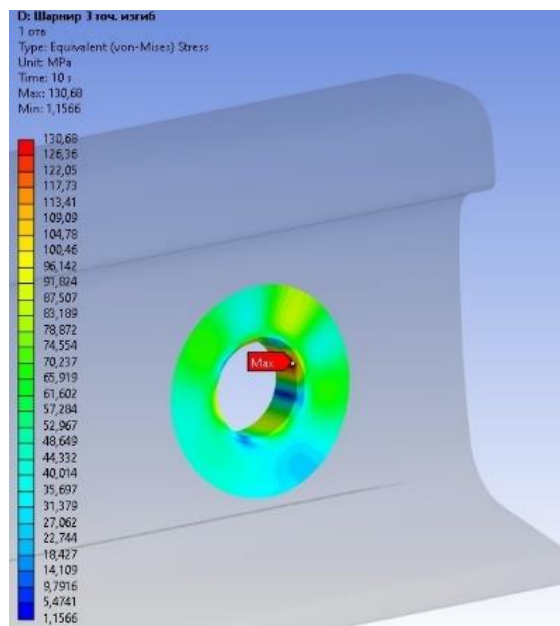
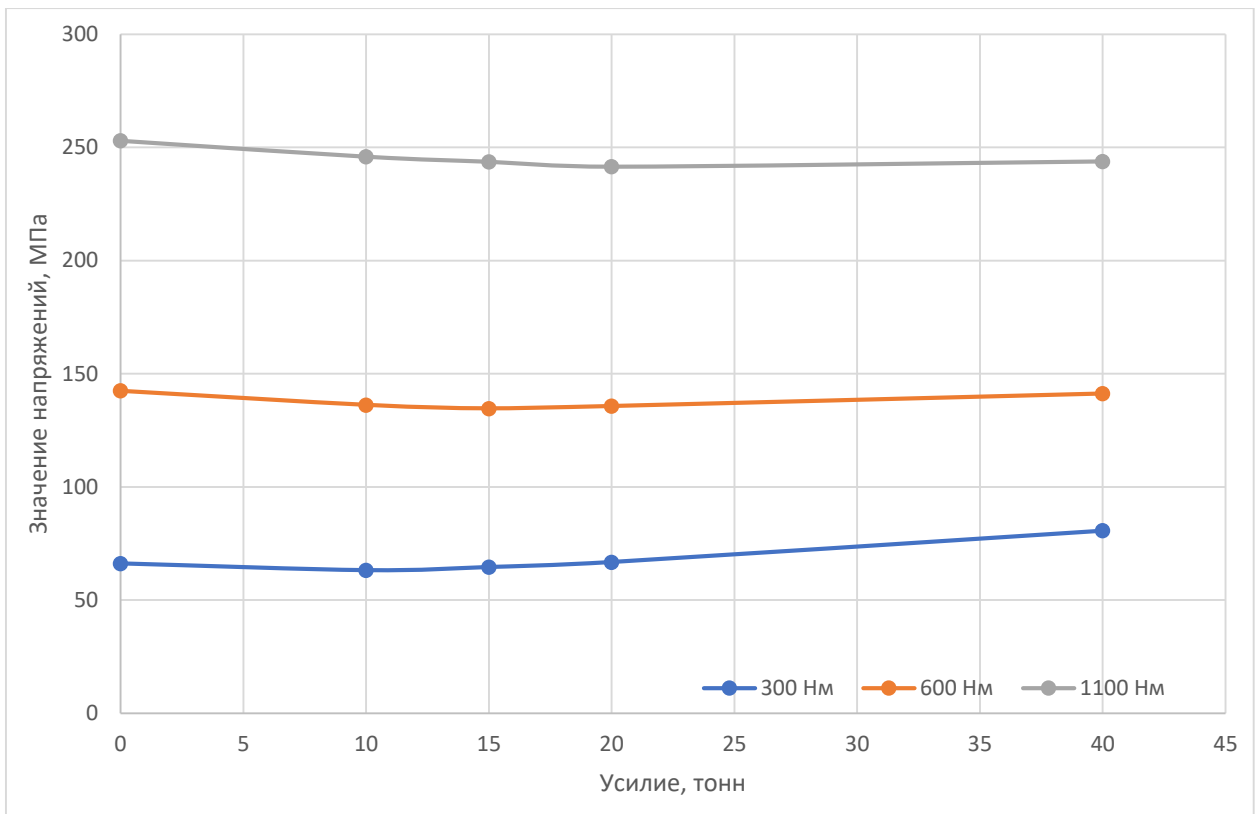
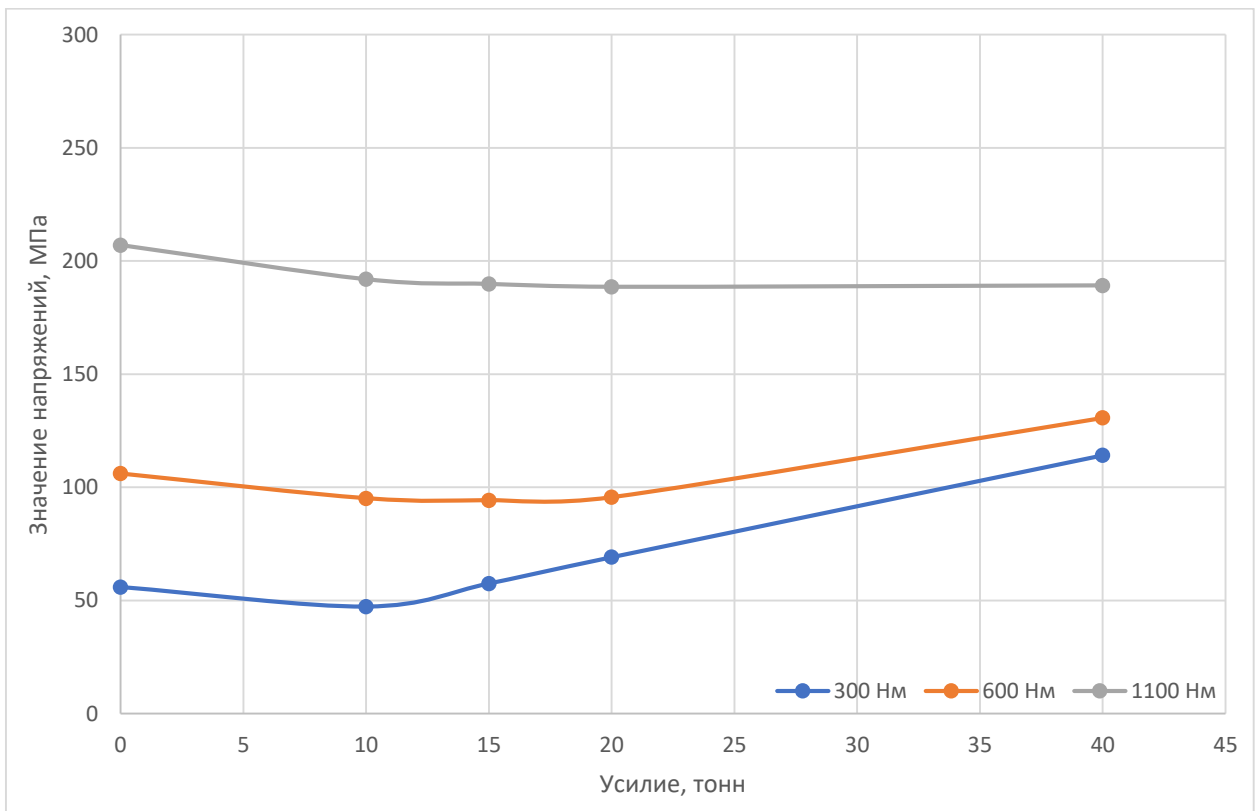


Рис. 5. Модель с рассчитанным напряженно-деформированным состоянием в области первого болтового отверстия

Для сравнительной оценки двух типов конструкций, были заданы моменты затяжки 300, 600, 1100 Нм, а также усилие 10, 15, 20, 40 тонн. Полученные зависимости эквивалентных напряжений приведены на рис. 6 для клиновидной конструкции стыка и на рис. 7 для шарнирной конструкции стыка.



**Рис. 6. Максимальные эквивалентные напряжения в первом болтовом отверстии с клиновидной конструкцией стыка**



**Рис. 7. Максимальные эквивалентные напряжения в первом болтовом отверстии с шарнирной конструкцией стыка**

Как видно из представленных графиков, шарнирная конструкция стыка имеет меньшие количественные характеристики механических напряжений начиная с момента

затяжки 600 Нм. Однако при моменте затяжки 1100 Нм, разница напряжений становится более заметна, особенно при нагрузке в 40 тонн.

Что касается прогибов стыка, то значения полученных зависимостей приведены и сгруппированы на рис. 8.

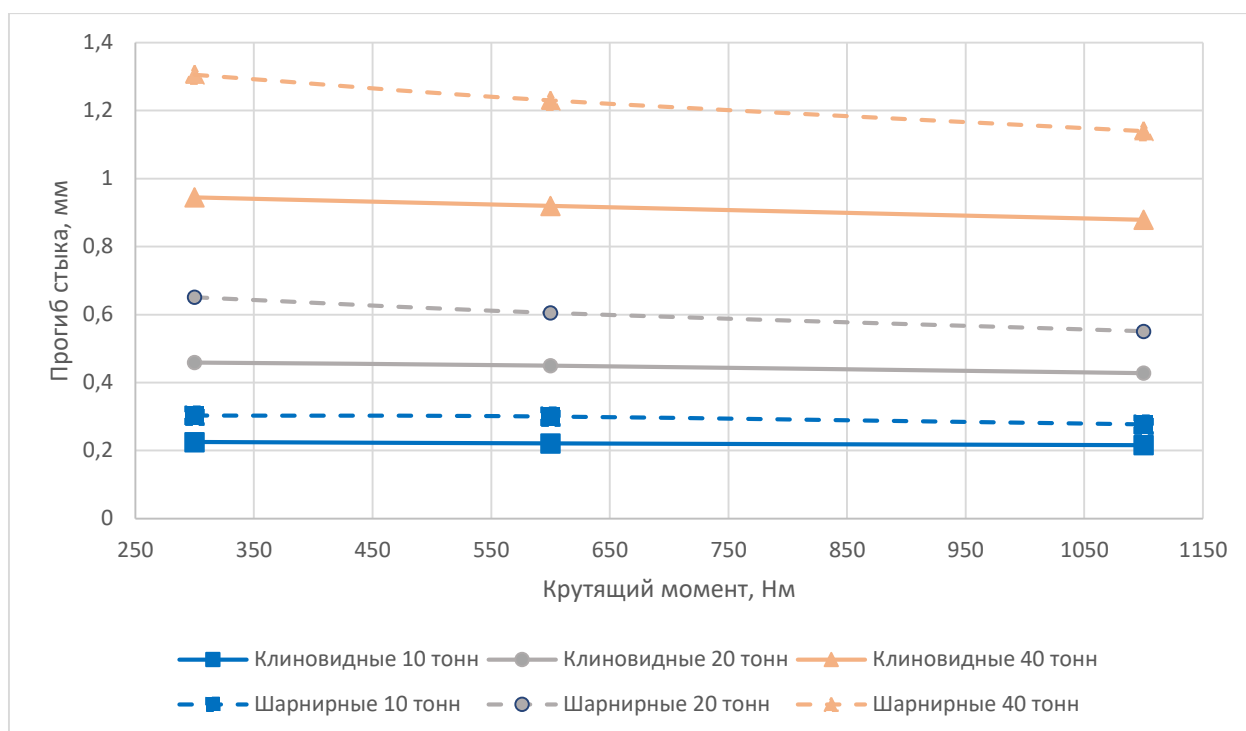


Рис. 8. Значение вертикальных прогибов рельсового конца при различных нагрузках для двух конструкций стыка

Значения вертикальных прогибов в конструкции шарнирного опирания имеют большие величины, нежели стандартный тип накладки. Это связано в первую очередь с самим видом опирания накладки на подголовье рельса. При этом чем больше нагрузка на стык, тем большая наблюдается разница в конструкциях стыка, вне зависимости от момента затяжки. Однако столь незначительные изменения вертикального прогиба, при соблюдении норм технической эксплуатации пути, не будут иметь столь негативный эффект от уменьшения жесткости стыка.

#### Экспериментально-верификационные исследования двух конструкций стыков

В рамках эмпирического исследования, направленного на верификацию теоретической модели, были проведены лабораторные тензометрические испытания стыковых болтов и рельсов. Для получения количественных данных использовался аналогово-цифровой преобразователь Lcard, обеспечивающий регистрацию деформаций с высокой точностью. С целью определения осевых усилий в болтах, тензорезисторы были наклеены с двух диаметрально противоположных сторон на гладкой цилиндрической поверхности болтов М27. Последующая обработка данных заключалась в вычислении полусуммы полученных значений, что позволило оценить величины напряжений для марки стали болтов (40Х). Внешний вид тензометрического болта в сборе представлен на рис.9.



Рис. 9. Тензометрический болт

Для получения монтажных напряжений на шейке рельса применялись тензодатчики, наклеиваемые с двух сторон шейки рельса, внешний вид наклейки датчиков на рельс приведен на рис. 10.

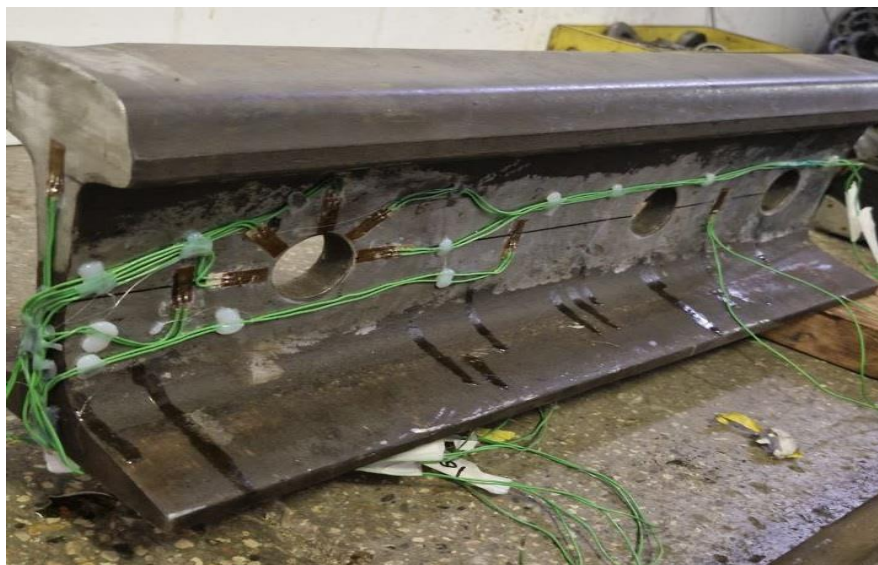


Рис. 10. Стыковой рельс для измерения деформаций

Эмпирически измеренные напряжения в болтах можно преобразовать в осевые силы с помощью стандартной формулы растяжения цилиндрического образца [15].

Значения полученных осевых усилий, растягивающих напряжений на стыковых болтах в зависимости от момента затяжки представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Значения осевых растягивающих напряжений и осевых усилий в болтах при различном моменте затяжки

Момент затяжки, Нм	Значения осевых растягивающих напряжений в болтах $\sigma$ , МПа	Q, Н
Шарнирные		
200	64,74	28678,5
300	99,03	43871,9
450	151,23	66994,9
600	201,52	89274,7
800	263,53	116743,3
1100	347,75	154053,3
Клиновидные		
200	70,00	31010,0
300	101,53	44979,4
450	145,47	64444,2
600	200,77	88942,4
800	268,73	119047,3
1100	344,75	152724,3

На основании полученных значений можно сделать вывод, что осевые растягивающие напряжения, как и осевые силы имеют линейную зависимость при приложении различных моментов затяжки. А значения самих напряжений не имеет особой разницы от конструкции накладок. Так же, значения осевых усилий имеют четкую корреляцию с теоретической формулой (1).

Экспериментальные значения монтажных напряжений на шейке рельса, в сравнении с расчетными, приведены в таблице 2.

**Таблица 2 - Значения монтажных напряжений в шейке рельса по сечениям в зависимости от момента затяжки**

Момент затяжки, Нм	Значения монтажных напряжений в шейке рельса $\sigma$ , МПа					
	Эксперимент			Математическая модель		
	Между 2 и 3 отверстием	Между 2 и 1 отверстием	На расстоянии 30 см от торца рельса	Между 2 и 3 отверстием	Между 2 и 1 отверстием	На расстоянии 30 см от торца рельса
Шарнирные						
300	20,20	15,96	12,40	27,60	11,68	15,50
600	47,30	27,15	37,59	55,28	26,64	29,27
1100	114,40	46,82	52,79	103,18	49,29	57,02
Клиновидные						
300	32,20	18,83	25,80	30,69	14,65	20,78
600	61,40	38,12	49,31	66,40	31,77	45,32
1100	135,70	63,30	90,64	122,58	58,70	81,80

Результаты проведенного сравнительного анализа свидетельствуют о достаточно высокой степени сходимости. Так же, установлено, что максимальные напряжения в шейке рельса локализованы между вторым и третьим болтовыми отверстиями. Данный эффект, вероятно, обусловлен концентрацией напряжений сжатия рельса, возникающих вследствие обжатия поверхностей двумя смежными болтовыми соединениями. Напротив, зафиксированы минимальные значения напряжений в области между первым и вторым болтовыми отверстиями, что, предположительно, связано с увеличенным расстоянием между поверхностями, подвергающимися обжатию, и, как следствие, снижением степени их взаимодействия. При анализе данных, характеризующих монтажные напряжения, установлено, что применение шарнирной конструкции приводит к их повсеместному снижению. Однако, следует отметить, что степень уменьшения напряжений не является равномерной по длине стыка и варьируется в диапазоне от 18% до 72%.

#### **Заключение**

На основании проведенных теоретически-экспериментальных расчетов двух конструкций стыков, было выявлено уменьшенное напряженно-деформированное состояние рельсового стыка в области шейки при применении конструкции шарнирной накладки.

Также получены значения осевых растягивающих сил и напряженного состояния стыкового болта в конструкции двух типов, что дает возможность использовать данные для дальнейших расчетов.

Созданная конечно-элементная модель показала высокую корреляцию результатов, что в свою очередь позволяет использовать принятые подходы моделирования для дальнейших более сложных расчетов на ее основе.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов» утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 №2499/р.
2. Малявин Д.А., Клементьев К.В. Проблема роста количества мест временного восстановления рельсовых плетей // Путь и путевое хозяйство, 2024, № 8, С. 18–21.
3. Романенко В.А., Мацкевич М.В., Востриков Д.В. Сокращение мест временного восстановления плетей // Путь и путевое хозяйство, 2024, № 6, С. 6-7.
4. Виногоров Н.П., Клементьев К.В. Как повысить надежность стыка: возможные варианты // Путь и путевое хозяйство, 2021, № 5, С. 21-24.
5. Малявин Д.А., Клементьев К.В. К вопросу снижения дефектности рельсов в стыковой зоне // Путь и путевое хозяйство, 2024, № 10, С. 11–13.
6. Шур Е.А. Повреждения рельсов, М.: Интекст, 2012, 192 с.
7. Влияние качества изготовления болтовых отверстий на надежность железнодорожных рельсов в зоне стыка / Е.А. Шур, И.А. Чурюмова, М.С. Бейзеров, И.Ф. Зайцев // Повышение эффективности и надежности работы рельсов: сборник научных трудов / ВНИИЖТ, М.: Транспорт, 1990, С. 80-89.
8. Повышение стабильности пути в зоне стыков за счет применения упругих подшпальных прокладок / В.О. Певзнер, М.М. Железнов, В.Н. Каплин, В.В. Третьяков, М.Н. Мысливец, А.С. Томиленко // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта, 2016, Т. 75, № 3, С. 140-146.
9. Лысюк В.С. Управление надежностью бесстыкового пути интенсивными методами // Управление надежностью железнодорожного пути: сборник науч-ных трудов / ВНИИЖТ, М.: Транспорт, 1991, С. 24-41.
10. Клинов С.И., Кондратьев А.А. Высокопрочные болты // Путь и путевое хозяйство, 1988, № 1, С. 33-35.
11. Влияние конструкции стыковых накладок на стабильность рельсового стыка / О.О. Клокова // Вопросы повышения надежности и уровня использования железнодорожного пути. Межвузовский сб.науч.тр., М.: изд. МИИТ, 1984, вып. 759, с. 77-87.
12. Лысюк В.С., Управлять надежностью пути // Путь и путевое хозяйство, 1990, № 2, С. 16-19.
13. Зверев Н.Б. Стыкование длинных рельсовых плетей // Тр. ВНИИЖТа. М.: Трансжелдориздат, 1962, Вып.244, С. 97-120.
14. ГОСТ 33185-2014 Накладки для изолирующих стыков железнодорожных рельсов. Требования безопасности и методы контроля. Введ. 2015-07-01.
15. Сапунов В.Т. Классический курс сопротивления материалов в решениях задач: Учебное пособие. Изд. 4-е. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. –160 с.

## REFERENCES

1. Instruktsiya «Defekty rel'sov. Klassifikatsiya, katalog i parametry defektnykh i ostrodefektnykh rel'sov» utv. Rasporyazheniem ОАО «RZhD» ot 23.10.2014 №2499/r [Instruction "Rail Defects. Classification, catalog and parameters of defective and acutely defective rails" approved by Order of JSC "RZD" dated October 23, 2014 No. 2499/r].
2. Malyavin, D. A., & Klement'ev, K. V. (2024). Problema rosta kolichestva mest vremennogo vosstanovleniya rel'sovykh pletei [The Problem of Increasing the Number of Temporary Rail String Restoration Sites]. Put' i putevoe khozyaistvo [Track and Track Facilities], No. 8, pp.18–21.
3. Romanenko, V. A., Matskevich, M. V., & Vostrikov, D. V. (2024). Sokrashchenie mest vremennogo vosstanovleniya pletei [Reducing the Number of Temporary String Restoration Sites]. Put' i putevoe khozyaistvo [Track and Track Facilities], No. 6, pp.6–7.

4. Vinogorov, N. P., & Klement'ev, K. V. (2021). Kak povysit' nadezhnost' styka: vozmozhnye varianty [How to Increase the Reliability of the Joint: Possible Options]. Put' i putevoe khozyaistvo [Track and Track Facilities], No. 5, pp.21–24.
5. Malyavin, D. A., & Klement'ev, K. V. (2024). K voprosu snizheniya defektnosti rel'sov v stykkovoi zone [On the Issue of Reducing Rail Defects in the Joint Zone]. Put' i putevoe khozyaistvo [Track and Track Facilities], No. 10, pp.11–13.
6. Shur, E. A. (2012). Povrezhdeniya rel'sov [Rail Damage]. Intekst.
7. Shur, E. A., Churyumova, I. A., Beizerov, M. S., & Zaitsev, I. F. (1990). Vliyanie kachestva izgotovleniya boltovykh otverstii na nadezhnost' zheleznodorozhnykh rel'sov v zone styka [Influence of the Manufacturing Quality of Bolt Holes on the Reliability of Railway Rails in the Joint Zone]. In Povyshenie effektivnosti i nadezhnosti raboty rel'sov: sbornik nauchnykh trudov / VNIIZhT [Improving the Efficiency and Reliability of Rail Operation: Collection of Scientific Papers / VNIIZhT] (pp. 80-89). Transport.
8. Pevzner, V. O., Zheleznov, M. M., Kaplin, V. N., Tret'yakov, V. V., Myslivets, M. N., & Tomilenko, A. S. (2016). Povyshenie stabil'nosti puti v zone stykov za schet primeneniya uprugikh podshpal'nykh prokladok [Increasing Track Stability in the Joint Zone by Using Elastic Under-Sleeper Pads]. Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Vestnik of the Scientific Research Institute of Railway Transport], No. 75 (3), pp.140-146.
9. Lysyuk, V. S. (1991). Upravlenie nadezhnost'yu besstykovogo puti intensivnymi metodami [Managing the Reliability of Continuous Welded Rail by Intensive Methods]. In Upravlenie nadezhnost'yu zheleznodorozhnogo puti: sbornik nauchnykh trudov / VNIIZhT [Managing the Reliability of Railway Track: Collection of Scientific Papers / VNIIZhT] (pp. 24-41). Transport.
10. Klinov, S. I., & Kondrat'ev, A. A. (1988). Vysokoprochnye bolty [High-Strength Bolts]. Put' i putevoe khozyaistvo [Track and Track Facilities], No. 1, pp. 33-35.
11. Klokova, O. O. (1984). Vliyanie konstruktсии stykovykh nakladok na stabil'nost' rel'sovogo styka [Influence of the Design of Joint Bars on the Stability of the Rail Joint]. In Voprosy povysheniya nadezhnosti i urovnya ispol'zovaniya zheleznodorozhnogo puti. Mezhvuzovskii sb.nauch.tr. [Issues of Improving the Reliability and Level of Use of Railway Track. Interuniversity Collection of Scientific Papers] (Vol. 759, pp. 77-87). Izd. MIIT.
12. Lysyuk, V. S. (1990). Upravlyat' nadezhnost'yu puti [Managing Track Reliability]. Put' i putevoe khozyaistvo [Track and Track Facilities], No. 2, pp. 16-19.
13. Zverev, N. B. (1962). Stykovanie dlinnykh rel'sovykh peletei [Joining Long Rail Sections]. Tr. VNIIZhTa [Transactions of VNIIZhT] (Vol. 244, pp. 97-120). Transzheldorizdat.
14. GOST 33185-2014 Nakladki dlya izoliruyushchikh stykov zheleznodorozhnykh rel'sov. Trebovaniya bezopasnosti i metody kontrolya. Vved. 2015-07-01 [GOST 33185-2014 Joint Bars for Insulating Joints of Railway Rails. Safety Requirements and Control Methods. Effective 2015-07-01].
15. Sapunov, V. T. (2008). Klassicheskii kurs soprotivleniya materialov v resheniyakh zadach: Uchebnoe posobie [Classical Course of Strength of Materials in Problem Solutions: Textbook] (4th ed.). Izdatel'stvo LKI.

#### **Информация об авторах**

*Трушкин Вячеслав Анатольевич* – ведущий инженер Научного центра «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва, e-mail: trushkin.vyacheslav@vniizht.ru

*Клементьев Кирилл Владимирович* - к. т. н., научный консультант Научного центра «Инфраструктура», Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, г. Москва e-mail: klementyev.kirill@vniizht.ru

### **Information about the authors**

*Trushkin Vyacheslav — Leading Engineer, Scientific Centre «Infrastructure», JSC «Railway Transport Research Institute» (JSC «VNIIZHT»), Moscow, e-mail: trushkin.vyacheslav@vniizht.ru*

*Klementiev Kirill — Scientific consultant of the Scientific Centre «Infrastructure» of JSC «VNIIZHT». Moscow, e-mail: klementyev.kirill@vniizht.ru*