

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Оригинальная научная статья

УДК 625.143:539.3:531.781.2

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

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



Остаточные эксплуатационные напряжения на поверхности катания рельса Р65

В. И. Сакало, А. В. Сакало✉

Брянский государственный технический университет (БГТУ),
Брянск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблемы долговечности рельсов и методов ее прогнозирования в условиях возрастания грузонапряженности железных дорог продолжают быть актуальными. В области контакта колеса и рельса возникают высокие напряжения, вызванные усилиями их взаимодействия. Они учитываются при оценке контактной прочности рельсов, и для их расчета разработаны эффективные, апробированные методы. Кроме контактных напряжений рельсы содержат в себе остаточные технологические напряжения, возникающие при холодной правке и термоупрочнении, однако эти напряжения претерпевают изменения в процессе эксплуатации рельса. Эти напряжения недостаточно хорошо изучены. Расчетно-экспериментальными методами получены распределения технологических остаточных напряжений во внутренних точках рельса. Эксплуатационные остаточные напряжения исследованы рентгеновским методом в основном для рельсов, изготовленных из зарубежных марок сталей с большим сроком эксплуатации. Целью работы является определение остаточных эксплуатационных напряжений на поверхности катания рельса Р65 при продолжительном силовом воздействии колес тяжеловесных грузовых вагонов.

Материалы и методы. Для определения эксплуатационных остаточных напряжений на поверхности катания рельса использован отрезок рельса длиной 750 мм. Он находился в эксплуатации в течение 20 лет в пути с тяжеловесным движением. Измерение деформаций выполнено с помощью метода электротензометрии. Для измерения использовались тензорезисторы с базой 5 мм и сопротивлением 52,4 Ом. В продольном направлении параллельно оси рельса было наклеено 9 тензорезисторов, а в поперечном 4 тензорезистора. Для определения остаточных напряжений использован метод релаксации напряжений.

Результаты. Получены распределения продольных и поперечных эксплуатационных остаточных напряжений по ширине поверхности катания рельса, а затем выполнен их анализ.

Обсуждение и заключение. Полученные значения продольных и поперечных эксплуатационных остаточных напряжений в точках поверхности катания рельса хорошо согласуются с результатами, полученными другими авторами с использованием рентгеновских методов. При исследовании остаточных напряжений в рельсах с достаточно большим сроком эксплуатации рентгеновскими методами установлено, что наибольшие напряжения примерно одинакового значения возникают в подповерхностном слое толщиной около 10 мм. В этом слое существует наибольшая вероятность зарождения усталостных трещин. Учет полученных остаточных напряжений в методах моделирования процессов накопления контактно-усталостных повреждений позволит их усовершенствовать и повысить достоверность получаемых результатов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железнодорожный рельс, остаточные напряжения, электротензометрия, тензорезистор, метод релаксации, рентгеновский метод исследования напряжений

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Сакало В. И., Сакало А. В. Остаточные эксплуатационные напряжения на поверхности катания рельса Р65 // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2025. Т. 84, № 2. С. 92–103.

Original article

UDK 625.143:539.3:531.781.2

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

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



Residual service stresses on tread of P65 rail

Vladimir I. Sakalo, Alexey V. Sakalo✉

Bryansk State Technical University,
Bryansk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The problems of rail durability and methods of forecasting it in conditions of increasing traffic density continue to be relevant. High stresses occur in the area of contact between the wheel and the rail, caused by the efforts of their interaction. They are considered in assessing contact strength of rails, and for their calculations effective and proven methods were developed. In addition to contact stresses rails contain residual process stresses that appear during cold straightening and thermal hardening, but these stresses undergo changes during rail operation. These stresses are not well studied. The distributions of technological residual stresses in the inner points of the rail are obtained by computational and experimental methods. Service residual stresses were studied by X-ray method mainly for rails made of foreign grades of steels with a long service life. The aim of the article is to determine the residual service stresses on the tread of P65 rail under the influence of long-term force action of the wheels of heavy-load cars.

Materials and methods. In order to determine the residual service stresses on the tread of rail, a 750 mm long piece of rail was used. It has been in service for 20 years in heavy traffic transit. The deformations were measured using the electric strain gauge measuring method. Strain gauges with a base of 5 mm and a resistance of 52.4 Ohms were used for measurement. Longitudinally, 9 strain gauges were glued in parallel to the rail axis, and 4 strain gauges were glued transversely. The stress relaxation method was used to determine the residual stresses.

Results. The authors obtained distributions of longitudinal and transverse residual service stresses over the width of the tread of rail and performed their analysis.

Discussion and conclusion. The obtained values of the longitudinal and transverse residual service stresses at the points of the tread of rail are in agreement with the results obtained by other authors using X-ray methods. When examining residual stresses in rails with sufficiently long service life using X-ray methods, it was found that the greatest stresses of approximately the same value arise in a subsurface layer with a thickness of about 10 mm. In this layer, there is the greatest probability of fatigue cracks. Considering the obtained residual stresses in the methods of modeling the processes of accumulation of rolling contact fatigue damage would allow to improve them and increase the accuracy of the obtained results.

KEYWORDS: rail, residual stresses, electric strain gauge measurement, strain gauge, relaxation method, X-ray research method of stresses

FOR CITATION: Sakalo V.I., Sakalo A.V. Residual service stresses on tread of P65 rail. *Russian Railway Science Journal*. 2025;84(2):92–103. (In Russ.).

✉ sakalo@umlab.ru (A. V. Sakalo)

© Sakalo V.I., Sakalo A.V., 2025

Введение. В железнодорожных рельсах существуют остаточные напряжения, значения которых сопоставимы со значениями напряжений в областях, прилегающих к контакту колеса и рельса, вызванных усилиями их взаимодействия. Введение остаточных напряжений в расчеты, выполняемые при оценке контактной прочности рельса, а также при моделировании процессов накопления контактно-усталостных повреждений в подконтактном слое материала позволяет повысить уровень достоверности получаемых результатов.

Технологические остаточные напряжения в рельсе возникают после завершения его изготовления операциями холодной правки и термической обработки. Они имеют небольшие значения по сравнению с напряжениями, вызванными силами взаимодействия колеса и рельса. Вблизи поверхности контакта продольные напряжения сжимающие. Они достигают значений 50–150 МПа. Поперечные напряжения — растягивающие — около 50 МПа [1].

В процессе эксплуатации рельса остаточные напряжения меняются. Так, например, в рельсе, бывшем в эксплуатации в течение 20 лет, наибольшие поперечные напряжения — сжимающие (около –300 МПа) — могут возникать под поверхностью катания в слое материала толщиной примерно 5 мм, а на глубине около 5–15 мм — растягивающие — около 200 МПа [2].

Расчетами, выполненными авторами с использованием решения Герца [3], было установлено, что в контакте вагонного колеса и рельса с неизношенными поверхностями катания при нагрузке 120 кН пятно контакта имеет эллиптическую форму с большой полуосью $a = 7,45$ мм, ориентированной поперек рельса, и малой полуосью $b = 7,24$ мм в продольном направлении. Возникает максимальное давление p_0 , равное 1056 МПа. Поперечные нормальные напряжения в центре контакта составили –788 МПа, продольные –662 МПа.

Значения остаточных эксплуатационных напряжений могут достигать 0,4 от значения напряжений, возникающих на поверхности контакта, обусловленных силами взаимодействия колеса и рельса. Задача экспериментального определения закономерностей изменения остаточных напряжений от технологических до эксплуатационных, зависящих от срока и условий эксплуатации рельса, является трудоемкой. Тем не менее в расчетах могут быть использованы интерполяционные зависимости, выведенные на основе уже полученных результатов.

Целью работы является исследование остаточных напряжений, возникающих на поверхности катания рельса типа Р65 при продолжительном силовом воздействии колес тяжеловесных грузовых вагонов.

Методы исследования напряжений. Для определения остаточных напряжений в рельсах применяются

следующие методы: электротензометрия, рентгеновский метод, метод конечных элементов, ультразвуковой, контурный.

Напряженное состояние в точках, расположенных на поверхности рельса и во внутренних точках, является трехосным. Экспериментальные методы позволяют определить относительные деформации: продольную ε_x , поперечную ε_y и вертикальную ε_z . Напряжения σ_x , σ_y , σ_z определяются с использованием зависимостей [15]

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)]; \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x)]; \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)],\end{aligned}\quad (1)$$

где σ_x , σ_y , σ_z — продольное, поперечное и вертикальное нормальные напряжения, МПа;

ε_x , ε_y , ε_z — относительная продольная, поперечная и вертикальная линейные деформации, безразмерные;

ν — коэффициент Пуассона, безразмерный;

E — модуль упругости при растяжении (первого рода), МПа.

Использование двухкомпонентных розеток тензорезисторов с ориентацией оси решетки одного тензорезистора вдоль оси x параллельно оси рельса, а другого вдоль оси y , перпендикулярной ей, позволяет определить продольное остаточное напряжение σ_{xR} и поперечное σ_{yR} .

Экспериментальный способ определения напряжений может комбинироваться с расчетным. Тогда результаты тензометрирования используются как исходные данные для вычисления остаточных напряжений во внутренних точках рельса.

В работе [4] остаточные технологические напряжения определены в рельсе, для которого выполнена заключительная операция — холодная правка. Использован отрезок рельса длиной 500 мм. На поверхности рельса было установлено 12 двухкомпонентных розеток тензорезисторов. Из отрезка рельса выделялся срез с установленными тензорезисторами путем выполнения двух поперечных разрезов с одной и другой стороны от цепочки розеток и третьего по вертикальной оси симметрии полученного среза. После выполнения первого разреза продольные остаточные напряжения вблизи разреза релаксируют. Были замерены обусловленные их релаксацией продольные деформации. На каждом этапе последующего выполнения разрезов они замерялись снова. Продольные деформации оставались практически неизменными при выполнении разрезов после первого разреза. С использованием результатов измерений были вычислены

остаточные напряжения в точках установки розеток тензорезисторов. Расчеты для определения напряжений во внутренних точках поперечного сечения рельса были проведены в программном комплексе ABAQUS. В качестве краевых условий использовались остаточные напряжения, вычисленные по результатам тензометрирования. Вблизи поверхности катания рельса получены остаточные напряжения: поперечные $\sigma_{11} = 50$ МПа, вертикальные $\sigma_{22} = -10$ МПа, продольные $\sigma_{33} = -50$ МПа.

В [1] приведены результаты аналогичных исследований. Остаточные технологические напряжения определены в рельсе, правленном с использованием роликовой правильной машины и термоупрочненным. Для определения остаточных напряжений применена расчетно-экспериментальная методика с регулирующим алгоритмом. На рельс было наклеено 30 тензорезисторов по всему контуру поперечного сечения симметрично относительно оси симметрии профиля рельса. Экспериментально определены продольные остаточные деформации на контуре поперечного сечения рельса по показаниям измерительных схем до вырезания среза и после. Они использованы как входные данные в интерполяционной методике. Она позволила определить продольные остаточные напряжения в объеме рельса. Наибольшие напряжения в головке рельса -150 МПа получены в областях, прилегающих к выкружкам на глубине около 5,8 мм.

В работе [5], посвященной исследованию условий возникновения дефектов рельсов, применен расчетно-экспериментальный метод с использованием тензорезисторов. Определены продольные остаточные напряжения в поперечных сечениях дифференцированно-термоупрочненного рельса ДТ350 и объемно-закаленного ОТ350. Для рельса ДТ350 в нижней части головки в областях, прилегающих к боковым поверхностям, получены значения сжимающих напряжений от -125 до -150 МПа. Под серединой поверхности катания находится область с растягивающими напряжениями, достигающими значения 250 МПа. Для рельса ОТ350 они составили соответственно: сжимающие -150 МПа и растягивающие 150 МПа.

В [6] для определения остаточных напряжений применен метод кольцевого сердечника, состоящий в следующем: на поверхность рельса наклеивается прямоугольная трехкомпонентная розетка тензорезисторов, снимаются показания измерительных схем, вокруг розетки высверливается кольцевая канавка, напряжения релаксируют, после чего снимаются показания схем и определяются значения главных остаточных напряжений и их направления.

В [7] продольные остаточные напряжения в сварном рельсе определены экспериментально методом высверливания отверстий на глубину 250 мкм. Моде-

лирование температурного поля и термомеханический анализ для этапов контактной сварки — предварительного нагрева, выжигания и осадки — выполнено методом конечных элементов с использованием программы ABAQUS. В слое материала, прилегающем к поверхности катания рельса, получены продольные сжимающие остаточные напряжения около -200 МПа. В нижней части головки рельса растягивающие напряжения достигали 718 МПа.

В [8] методом сверления отверстий определены остаточные напряжения на поверхности рельса, изготовленного из сплава U71Mn контактной сваркой. Процесс термоупругопластической деформации смоделирован с использованием конечно-элементной модели комплекса FEM JWRIAN 2010. Замеры выполнены с использованием трехкомпонентных розеток тензорезисторов. В поперечном сечении рельса, проходящем по сварному стыку, получены средние поперечные напряжения, равные 18,74 МПа, а в сечении, отстоящем на расстоянии 20 мм, 11 МПа. Продольные остаточные напряжения составили -215 и -224 МПа соответственно.

В работе [9] применен конечно-элементный метод моделирования для определения влияния лазерного порошкового напыления, применяемого для восстановления изношенных рельсов, на остаточные напряжения. Получены распределения продольных, поперечных и вертикальных остаточных напряжений по длине, ширине и толщине области материала, расположенной под поверхностью катания.

В [10] с использованием трехмерных конечно-элементных моделей колеса и рельса исследовано влияние технологических остаточных напряжений в рельсе на напряженное состояние в областях, прилегающих к контакту. В качестве варьируемых факторов рассматривались нагрузка на колесо, коэффициент трения, продольный крип. Приведена картина распределения продольных остаточных напряжений. В верхней части головки рельса они растягивающие, величиной около 96 МПа. Сжимающие напряжения до -200 МПа наблюдаются на расстоянии 11–16 мм в центральной части под серединой поверхности катания.

В [11] исследовано влияние конструкции вертикальных и горизонтальных правильных роликов на остаточные напряжения в железнодорожном рельсе. Использован пакет Forge для конечно-элементного моделирования. Получены распределения поперечных и вертикальных остаточных напряжений, возникающих после правки рельса. Поперечные напряжения в верхней части головки рельса сжимающие и составляют около -100 МПа. В расположенном ниже слое они растягивающие около 60 МПа.

Работа [12] посвящена разработке моделей прогнозирования остаточных напряжений, возникающих

после роликовой правки рельса. Выявлено влияние напряжений, вызванных изгибом рельса, и контактных напряжений на остаточные напряжения. В программе ABAQUS построена трехмерная конечно-элементная модель с использованием плоской модели для поперечного сечения, образованной из четырехугольных элементов. Сетка сгущена в верхней части головки рельса для обеспечения корректного определения напряжений в области контакта рельса с правильными роликами. Напряжения в поперечном сечении определялись от изменяющегося в процессе правки изгибающего момента. Получены распределения продольных остаточных напряжений по высоте рельса.

В [13] исследован механизм формирования остаточных напряжений в рельсе со сварным стыком. Влияние силы осадки, включая температурный диапазон и ее величину, исследовано с использованием термического упругопластического конечно-элементного анализа. В головке рельса получены сжимающие напряжения, достигающие значения -648 МПа.

Рентгеновские методы нашли применение для определения остаточных напряжений во внутренних точках деталей. Облучение детали рентгеновскими лучами позволяет определить остаточные напряжения в точках поверхностного слоя детали по искажению кристаллической решетки материала, вызванной этими напряжениями.

В работе [14] рентгеновскими методами определены технологические остаточные напряжения в новом рельсе и бывшем в эксплуатации в течение 23 лет. Поперечные и вертикальные напряжения получены для выделенных срезов рельса толщиной 5 мм. Продольные напряжения получены контурным методом. После выполнения разреза исследован профиль поверхности поперечного сечения рельса и по продольным перемещениям его точек определены продольные напряжения. Для нового рельса получены наибольшие продольные напряжения -150 МПа в областях, прилегающих к выкружкам головки рельса, и поперечные напряжения примерно -200 МПа в области, прилегающей к поверхности катания. В изношенном рельсе в слое материала толщиной около 10 мм, прилегающем к поверхности катания, поперечные напряжения достигают -300 МПа.

В [15] исследованы деформации в изношенном рельсе, изготовленном из перлитной стали марки 260 (масса 56 кг/м). Использован срез рельса толщиной 16 мм. Хотя рельс был изношен, существенных изменений профиля не было обнаружено. Головка рельса была покрыта сеткой с расстоянием 2 мм между ее точками. Замеры в точках сетки выполнены с помощью нейтронного дифрактометра. Получены распределения поперечных, вертикальных и продольных

остаточных деформаций в головке рельса. С использованием закона Гука для трехосного напряженного состояния определены соответствующие остаточные напряжения. Продольные напряжения в подконтактном слое толщиной 6 мм в основном сжимающие до -150 МПа. Поперечные остаточные напряжения в этом слое превышают -200 МПа. На глубине более 6 мм в области, прилегающей к оси симметрии профиля рельса, возникают растягивающие напряжения около 150 МПа.

В [2] исследованы остаточные напряжения в срезах рельса, прилегающих к стыку. Рассматривались рельсы в состоянии «после изготовления», «частично поврежденный» и «сильно поврежденный». Использовался нейтронный сканер. Замеры поперечных и вертикальных напряжений выполнены на поперечном срезе рельса толщиной 5 мм. Напряжения измерялись в узлах сеток, использованных для поперечного и продольного срезов. Для рельса с частично поврежденным стыком и сильно поврежденным под поверхностью катания на глубине до 5 мм получены сжимающие продольные и поперечные остаточные напряжения в -300 МПа, а на глубине 15 мм растягивающие в 200 МПа. Значения продольных остаточных напряжений получены с использованием продольного среза. В подконтактном слое они сжимающие и достигают значений -300 МПа. На глубине 34 мм они растягивающие, около 300 МПа.

В [16] для определения остаточных эксплуатационных напряжений использован отрезок прямого рельса длиной 0,5 м, изготовленного из стали JIS E 1101. Рельс находился в эксплуатации в течение 6 лет (пропущенный тоннаж составил 222 млн тонн). Он был подвергнут шлифовке примерно через 2 года после укладки в путь. Глубина шлифовки составила 0,4 мм. Для испытаний на расстоянии 125 мм от торца отрезка плоскостью, перпендикулярной оси z , был выделен срез, прилегающий к поверхности катания головки рельса, размерами 73,5 мм по продольной оси x , 65 мм по поперечной оси y и 14,35 мм по толщине. Измерение остаточных деформаций проведено с использованием анализатора остаточных напряжений RESA. Деформации измерялись по трем направлениям: продольные вдоль оси x , поперечные по оси y и по оси z , перпендикулярной осям x и y . С использованием закона Гука для трехосного напряженного состояния вычислены остаточные напряжения в точках, расположенных на глубине 1,5–4,0 мм по центру рельса и на расстоянии $y = 22,5$ мм от центра по направлению к выкружке рельса. По центру рельса продольные и поперечные напряжения сжимающие, близки по значению к -100 МПа с минимумами -20 и -50 МПа на глубине 2–2,5 мм. В точках, расположенных у выкружки рельса на глубине 1,5 мм, они примерно одинаковой

величины и равны –175 МПа, а у выкружки уменьшаются до –100 МПа.

В [17] исследованы остаточные напряжения в рельсе типа 136RE, восстановление изношенной поверхности которого проведено путем лазерного порошкового напыления. Для этого был использован рентгеновский метод. Получены распределения продольных и поперечных напряжений в зависимости от положения напыляемого слоя. Продольные напряжения для слоев 1, 3, 5 — растягивающие и составили 375, 240 и 320 МПа соответственно. Поперечные остаточные напряжения для слоев 1, 4, 5 растягивающие, равны 250, 190 и 260 МПа соответственно.

В [18] определены остаточные напряжения в зоне сварного стыка. Замеры выполнены рентгеновским методом. Представлены графики распределения продольных и поперечных остаточных напряжений. В центре шва располагается зона растягивающих напряжений со значениями до 391 МПа. По мере удаления от шва они меняются на сжимающие со значением до –166 МПа.

В [19] исследованы остаточные напряжения в головке рельса ультразвуковым методом с использованием разработанного зонда. Получены графики остаточных напряжений для трех образцов в зависимости от расстояния до средней линии по высоте головки. Они изменяются в диапазоне от –400 до –1400 МПа.

В работе [20] представлен контурный метод определения продольных остаточных напряжений, состоящий в следующем. Деталь разрезается на две части, и сканируется геометрия полученной новой поверхности среза для определения перемещений, вызванных релаксацией остаточных напряжений. Эти перемещения используются для определения остаточных напряжений каким-либо аналитическим методом, например, методом конечных элементов. После построения конечно-элементной модели в качестве краевых условий узлам задаются перемещения, противоположные по знаку полученным при сканировании профиля. По принципу суперпозиции Бюхнера этот расчет дает остаточные напряжения, перпендикулярные плоскости среза.

В [21] представлены изолинии продольных остаточных напряжений в головке рельса. На поверхности катания они достигают значения –152 МПа, а на глубине 9 мм равны нулю. Ниже располагается область с растягивающими напряжениями, превышающими 200 МПа.

Выполненный анализ показал, что широкое применение для исследования остаточных напряжений в рельсах получил рентгеновский метод. Он позволяет определить напряжения во внутренних точках рельса и на его поверхности, что является его достоинством. Выполняются поперечные срезы рельса чаще всего толщиной 5 мм. Просвечивание их рентгеновскими

лучами позволяет определить распределения поперечных и вертикальных остаточных напряжений. Для определения продольных остаточных напряжений используются продольные срезы. В таком применении метод является разрушающим.

К разрушающим относится также электротензометрический метод. При определении продольных остаточных напряжений на поверхность рельса наклеиваются тензорезисторы, ориентированные осями решеток в продольном направлении рельса. Затем выделяется поперечный срез с тензорезисторами и по показаниям измерительных схем, снятых до выполнения среза и после, определяются напряжения. Метод обеспечивает получение достаточно точных результатов. Результаты экспериментального метода используются для определения напряжений во внутренних точках рельса при применении расчетного метода, например, метода конечных элементов. При этом они задаются для конечно-элементной модели в качестве краевых условий. Для определения всех компонентов остаточных напряжений в отдельных точках поверхности рельса, в предположении, что напряженное состояние является плоским, используется метод высверливания отверстий и метод кольцевого сердечника. При этом используются трехкомпонентные розетки тензорезисторов.

Ультразвуковой метод для определения остаточных напряжений в рельсе используется редко. Он позволяет определить усредненные по ширине головки рельса продольные и вертикальные напряжения.

В своем исследовании авторы использовали метод электротензометрии.

Метод электротензометрии. При применении данного метода используются розетки тензорезисторов. В точке поверхности рельса наклеивается один тензорезистор либо двухкомпонентная или трехкомпонентная розетки тензорезисторов. Принимается допущение о том, что в месте расположения тензорезисторов напряженное состояние является плоским и напряжение, перпендикулярное поверхности, не учитывается. На рис. 1 показана двухкомпонентная розетка из тензорезисторов 1 и 2, наклеенных на поверхность детали 3. Они подпаиваются в мостовые измерительные схемы.

Если для определения остаточных напряжений используется метод релаксации напряжений, то снимаются показания измерительных схем A_i^0 в единицах шкалы измерителя деформаций или единицы светового табло. При вырезании прямоугольного фрагмента 3 детали малой толщины (рис. 1) остаточные напряжения в нем релаксируют, т. е. уменьшаются до нуля. После этого снимаются показания измерительных схем A_i^P . С использованием разностей показаний $A_i^P - A_i^0$, где A_i^0 — показание измерительной схемы с i -м тензорезистором до вырезания фрагмента рельса,

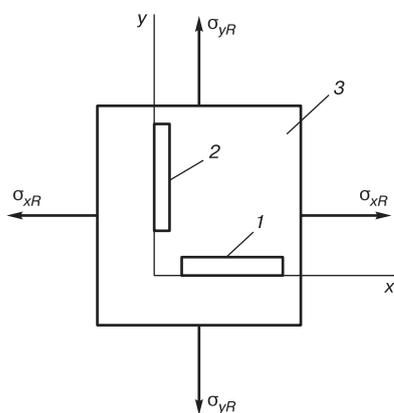


Рис. 1. Двухкомпонентная розетка тензорезисторов*:
1, 2 — тензорезисторы; 3 — фрагмент детали
* Источник: выполнено авторами

Fig. 1. Two-component strain gauge socket*:
1, 2 — strain gauges; 3 — detail piece
* Source: developed by the authors

а A_i^P — показание измерительной схемы i -м тензорезистором после вырезания фрагмента рельса, а также определяются относительные деформации ϵ_x (продольная) и ϵ_y (поперечная) [22]:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= C(A_1^P - A_1^0); \\ \epsilon_y &= C(A_2^P - A_2^0), \end{aligned} \quad (2)$$

где C — цена деления шкалы измерителя деформаций или единицы его светового табло.

Расчетное снятие остаточных напряжений σ_{xR} и σ_{yR} осуществляется приложением к вырезанному фрагменту напряжений противоположного знака. Например, в случае сжимающих остаточных напряжений относительные линейные деформации элемента при приложении положительных снимающих напряжений выражаются зависимостями прямого закона Гука [4]:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E}(\sigma_{xR} - \nu\sigma_{yR}); \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E}(\sigma_{yR} - \nu\sigma_{xR}), \end{aligned} \quad (3)$$

где E — модуль упругости материала рельса при растяжении; ν — коэффициент Пуассона; σ_{xR} , σ_{yR} — продольное и поперечное остаточные нормальные напряжения, МПа.

Деформации ϵ_x и ϵ_y определены экспериментальным методом. Тогда остаточные напряжения могут быть вычислены с использованием зависимостей

$$\begin{aligned} \sigma_{xR} &= -\frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_x + \nu\epsilon_y); \\ \sigma_{yR} &= -\frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_y + \nu\epsilon_x). \end{aligned} \quad (4)$$

Остаточные напряжения принимают со знаком, противоположным знаку снимающих напряжений.

Наиболее надежным способом определения остаточных напряжений методом релаксации является вырезание фрагмента детали с наклеенным тензорезистором. Однако достаточная точность может быть также получена и при выполнении пропилов определенной глубины вокруг тензорезистора. С использованием конечно-элементной модели стальной полосы с боковыми вырезами авторами исследовано влияние глубины вырезов на напряжения на расположенной между ними поверхности, на которую наклеен тензорезистор (рис. 2).

Были приняты следующие размеры полосы: длина $L = 104$ мм, ширина $B = 50$ мм, толщина $\delta = 1$ мм. Ширина вырезов принята равной 2 мм. Длина поверхности между вырезами, на которую наклеивается тензорезистор, принята равной 20 мм. Расчеты выполнены для глубин вырезов 4, 6, 8 и 10 мм.

На узлы конечно-элементной модели, расположенные в плоскости $y = 0$, наложены связи, параллельные оси y , а на узлы, расположенные в плоскости

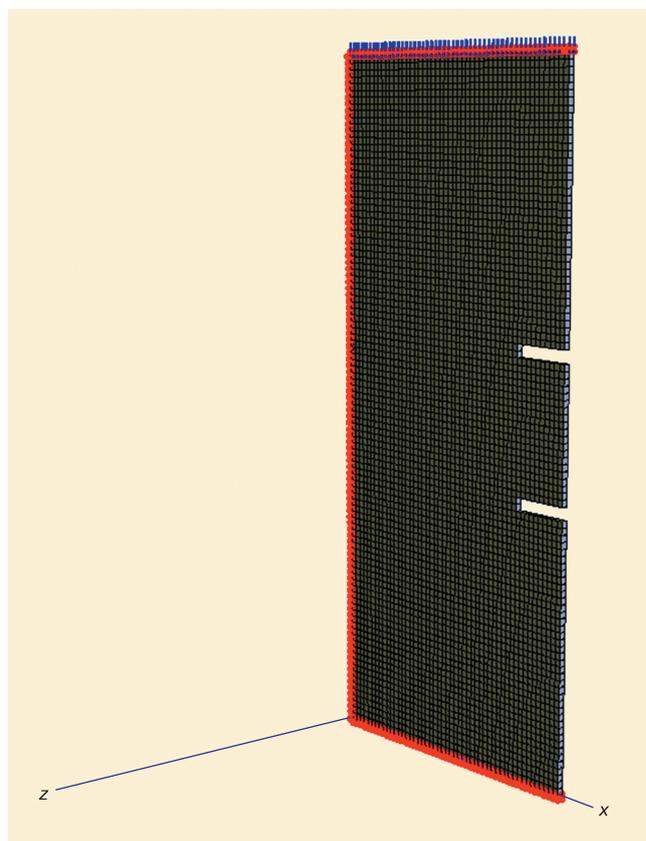


Рис. 2. Конечно-элементная модель полосы с боковыми вырезами*
* Источник: разработан авторами

Fig. 2. Finite-element model of a plate with side cutouts*
* Source: developed by the authors

$x = 0$ связи, параллельные оси x . В качестве краевого условия было задано перемещение узлов, расположенных на верхнем торце полосы, по оси y , равное 0,1 мм. При этом напряжение в поперечном сечении полосы на удалении от вырезов составило 200 МПа.

Распределения напряжений σ_y на длине участка с тензорезистором показаны на рис. 3. При глубине выреза, равной половине длины участка, на котором наклеен тензорезистор, напряжения становятся пренебрежимо малыми. Этот вывод использовался при выполнении резов в рельсе.

Определение остаточных эксплуатационных напряжений на поверхности катания рельса. Исследования проведены на отрезке рельса Р65 длиной 750 мм из прямого участка пути, который эксплуатировался в течение 20 лет на пути с тяжеловесным движением рельса Р65 длиной 750 мм из прямого участка пути, который эксплуатировался в течение 20 лет на пути с тяжеловесным движением. Для исследований использован метод электротензометрирования с тензорезисторами базой 5 мм и сопротивлением 52,4 Ом [22].

На рельс было наклеено 9 продольных тензорезисторов с осями решеток, параллельными оси рельса. Их расположение с нумерацией от наружной выкружки рельса приведено на рис. 4, а и рис. 5. В поперечном направлении относительно оси рельса было наклеено 4 тензорезистора, их расположение показано на рис. 4, б и рис. 6. На рис. 6 буквой «а» помечена линия, от которой отсчитывались координаты s тензорезисторов. Она представляет собой границу между изношенной и неизношенной поверхностью головки рельса.

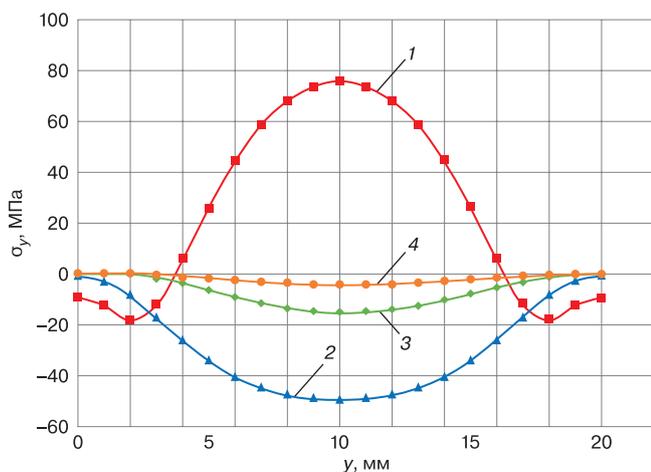


Рис. 3. Эпюры напряжений σ_y для участка наклейки тензорезисторов*
Глубина выреза: 1 – 4 мм; 2 – 6 мм; 3 – 8 мм; 4 – 10 мм
* Источник: разработан авторами

Fig. 3. Stresses σ_y distribution diagram for strain gauges gluing area*
The depths of cutouts: 1 – 4 mm; 2 – 6 mm; 3 – 8 mm; 4 – 10 mm
* Source: developed by the authors

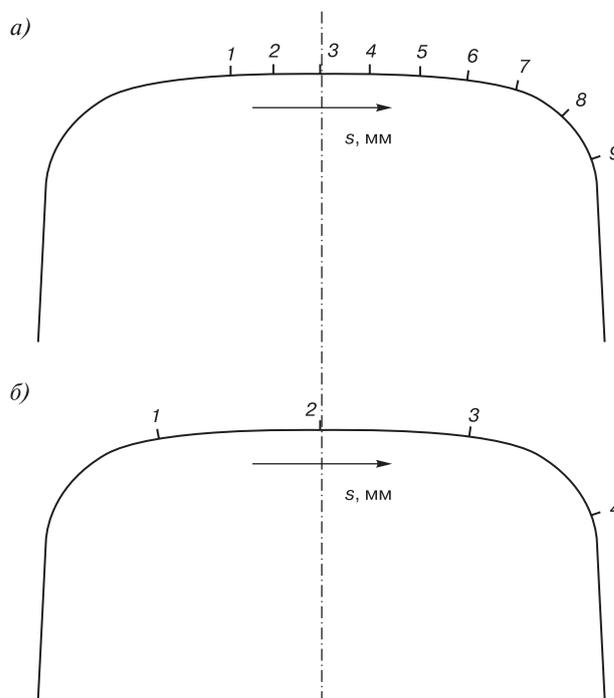


Рис. 4. Расположение тензорезисторов*:
а – продольных; б – поперечных
* Источник: разработан авторами

Fig. 4. Strain gauges position*:
а – longitudinal; б – transverse
* Source: developed by the authors

Тензорезисторы были подпаяны в полумостовые измерительные схемы и покрыты лаком ПФ 170 для защиты от охлаждающей жидкости, подаваемой при получении поперечного среза рельса. После высыхания лака были сняты показания измерительных схем A_i^0 . Для измерений использовался измеритель тензометрический цифровой ИТЦ-1 с ценой единицы светового табло $C = 10^{-6}$.

Срез с продольными тензорезисторами не вырезался. Пропилы были выполнены на всю высоту головки рельса (рис. 5). На рис. 7 показана операция выполнения поперечного пропила в рельсе справа от продольных тензорезисторов ленточной пилой.

Измерения показаний схем с продольными тензорезисторами выполнены до осуществления поперечных пропилов (A_i^0) и после (A_i^P).

После выполнения пропилов продольные напряжения релаксировали. Этому процессу релаксации соответствует деформация тензорезистора ε_x . К ней прибавилась деформация ε_y , обусловленная остаточными напряжениями σ_{yR} , которая получила возможность реализоваться. С использованием результатов измерений определялась сумма деформаций [22]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_x + \nu\varepsilon_y = C(A_i^P - A_i^0). \quad (5)$$



Рис. 5. Расположение продольных тензорезисторов*
* Источник: фото авторов

Fig. 5. Longitudinal strain gauges position*
* Source: authors' photo

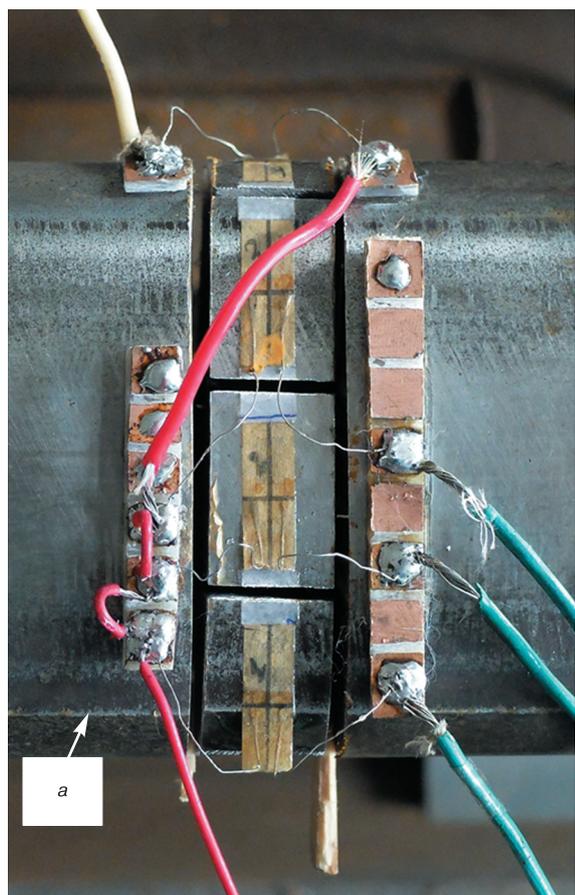


Рис. 6. Расположение поперечных тензорезисторов*
a — линия, от которой отсчитывались координаты *s* тензорезисторов
* Источник: фото авторов

Fig. 6. Transverse strain gauges position*
a — line from which the coordinates *s* of the strain gauges were measured
* Source: authors' photo



Рис. 7. Выполнение поперечного разреза рельса ленточной пилой*
* Источник: фото авторов

Fig. 7. Transverse cutting of the rail with a band saw*
* Source: authors' photo

Продольные остаточные напряжения σ_{xR} вычислены с использованием зависимости (4):

$$\sigma_{xR} = -\frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_x + \nu\epsilon_y) = -\frac{E}{1-\nu^2}\epsilon^*. \quad (6)$$

Пропилы для получения среза с поперечными тензорезисторами выполнялись до отверстия в шейке рельса. Срез был выделен из рельса (рис. 8). После этого в нем были выполнены продольные пропилы так, чтобы сохранить целостность среза.

Поперечные деформации определены с использованием зависимости

$$\epsilon_y = C(A_i^P - A_i^0), \quad (7)$$

где A_i^0 — показания измерительных схем с поперечными тензорезисторами до выполнения продольных



Рис. 8. Срез с поперечными тензорезисторами с вырезами*
* Источник: фото авторов

Fig. 8. Slice with transverse strain gauges with cutouts*
* Source: authors' photo

пропилов в срезе; A_i^P — показания измерительных схем после выполнения продольных пропилов.

Поперечные остаточные напряжения σ_{yR} вычислены с использованием зависимости (4), в которой $\varepsilon_x = (\varepsilon^* - \nu\varepsilon_y)$.

При вычислении напряжений модуль упругости материала рельса E принимался равным $2 \cdot 10^{11}$ Па, а коэффициент Пуассона ν равнялся 0,3.

Результаты. Графики изменения остаточных напряжений в зависимости от координаты s точки, отсчитываемой от линии «а» по контуру поперечного сечения рельса, показанной на рис. 6, приведены на рис. 9.

Напряжения σ_{yR} сжимающие, достигают значения -350 МПа у наружной выкружки рельса и незначительно меняются по ширине поверхности катания, снижаясь до -279 МПа вблизи внутренней выкружки. Напряжения σ_{xR} сжимающие, достигают значения -222 МПа у наружной выкружки рельса и снижаются по ширине поверхности катания до -149 МПа вблизи внутренней выкружки.

Обсуждение и заключение. Остаточные напряжения в рельсе оказывают значительное влияние на его контактно-усталостную долговечность. При изготовлении рельса в результате его правки и термического упрочнения в нем образуются остаточные технологические напряжения. Исследованиями с использованием тензометрии установлено, что на поверхности катания и в слое материала головки рельса, расположенном под поверхностью, возникают растягивающие поперечные напряжения около 50 МПа и продольные сжимающие напряжения значительной величины около -150 МПа. В процессе эксплуатации в результате пластического

деформирования материала рельса в областях контакта с колесом система остаточных напряжений претерпевает изменения. Рентгеновские методы измерения напряжений позволяют получить распределения поперечных, вертикальных и продольных эксплуатационных напряжений в поперечном сечении рельса. В подконтактном слое толщиной до 10 мм продольные и поперечные напряжения становятся сжимающими и достигают значений -300 МПа.

При применении рентгеновских методов и тензометрии используется отрезок рельса, из которого вырезаются поперечные и продольные срезы и их фрагменты. Очевидно, это затрудняет проведение исследований для рельсов с различным пропущенным тоннажем с целью установления закономерностей изменения системы остаточных напряжений. Исследования проведены в основном для рельса, находившегося в эксплуатации более 20 лет, либо на отрезке рельса, прилегающем к стыку «значительно поврежденному» или «сильно поврежденному».

В статье представлены результаты определения методом электротензометрии остаточных эксплуатационных напряжений на поверхности катания рельса Р65, находившегося в эксплуатации в главном пути, на прямолинейном участке при воздействии колес грузового подвижного состава в течение 20 лет. Распределения остаточных продольных и поперечных напряжений хорошо согласуются с результатами, полученными другими авторами с помощью рентгеновских методов, что позволяет ввести их в расчеты для оценки контактной усталости рельса, повысить достоверность получаемых результатов и приблизить к результатам, получаемым в эксплуатации.

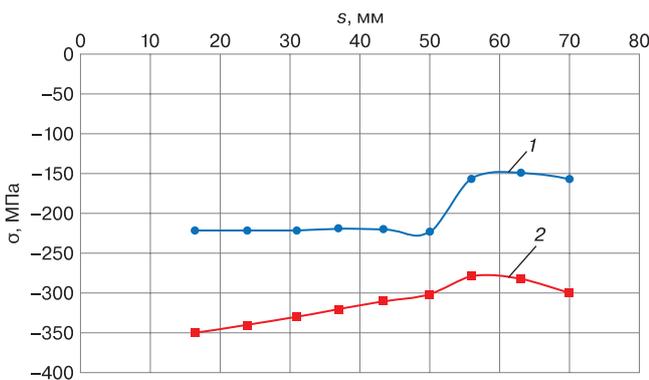


Рис. 9. Распределения остаточных эксплуатационных напряжений на поверхности катания рельса*:
1 — продольные напряжения σ_{xR} ;
2 — поперечные напряжения σ_{yR}
* Источник: разработан авторами

Fig. 9. Distribution of residual service stresses on the tread of rail*:
1 — longitudinal stresses σ_{xR} ; 2 — transverse stresses σ_{yR}
* Source: developed by the authors

Благодарности: авторы выражают благодарность за помощь в подготовке и проведении экспериментальных исследований доктору технических наук Хандожко Александру Владимировичу, инженеру Михайлову Николаю Николаевичу, инженеру Сергеенко Владиславу Сергеевичу.

Acknowledgments: the authors express their gratitude to Alexander Vladimirovich Khandozhko, Doctor of Technical Sciences, Nikolai Nikolaevich Mikhailov, engineer, and Vladislav Sergeenko, engineer, for their assistance in preparing and conducting experimental research.

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. Фимкин А. И., Долотказин Д. Б. Расчетно-экспериментальный метод определения продольных остаточных напряжений в железнодорожных рельсах // Вестник Московского института инженеров ж.-д. транспорта (МИИТ). 2001. № 6. С. 28–39.
2. Fimkin A. I., Dolotkazin D. B. Computational and experimental method for determining longitudinal residual stresses in railway rails. *Bulletin of the Moscow Institute of Railway Transport Engineers (MIIT)*. 2001;(6):28–39 (In Russ.).
3. Luzin V., Rathod C., Wexler D., Boyd P., Dhanasekar M. Residual Stresses in Rail-Ends from the in-Service Insulated Rail Joints Using Neutron Diffraction. *Materials Science Forum*. 2013;768–769:741–746. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.768-769.741>.
3. Тимошенко С. П., Гудьер Д. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 575 с.
- Timoshenko S. P., Goodyer D. Theory of Elasticity. Moscow: Nauka Publ.; 1975. 575 p. (In Russ.).
4. Takahashi Sh., Sasaki T., Kondoh Y., Hirose Y. Residual stress evaluation of railway rails. *Materials Science Forum, Residual Stresses VII: ECRS 7. Proceedings of the 7th European Conference on Residual Stresses, 13–15 September 2006, Berlin, Germany*. P. 381–386.
5. Комплексный подход к прогнозированию работоспособности и ресурса рельсов нового поколения / И. Г. Горячева [и др.] // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2017. № 5–6. С. 16–26. EDN: <https://www.elibrary.ru/ynebj>.
- Goryacheva I. G., Zakharov S. M., Kogan A. Ya., Torskaya E. V., Shur E. A., Abdurashitov A. Yu., Borts A. I., Zagranichnik K. L. Complex approach to forecasting the operability and resource of new generation rails. *Bulletin of the Joint Scientific Council of Russian Railways*. 2017;(5–6):16–26 (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/ynebj>.
6. Moazam M. A., Honaripisheh M. Residual Stresses Measurement in UIC 60 Rail by Ring-Core Method and Sectioning Technique. *AUT Journal of Mechanical Engineering*. 2018;2(1):97–104. <https://doi.org/10.22060/mej.2017.12879.5457>.
7. Skyttebol A., Josefson B. L., Ringsberg J. W. Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005;72:271–285. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2004.04.009>.
8. Cai Zhipeng, Nawafune Masashi, Ma Ninshu, Qu Yuebo, Cao Bin, Murakawa Hidekazu. Residual Stresses in Flash Butt Welded Rail. *Transactions of JWRI*. 2011;40(1):79–87.
9. Mortazavian E., Wang Z., Teng H. Finite element investigation of residual stresses during laser powder deposition process as an innovative technique to repair worn rails. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2022;237(1):21–32. <https://doi.org/10.1177/09544097221089410>.
10. Li Y., Chen J., Wang J., Zhao H., Chen L. Study on the residual stress distribution of railway rails. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2020; 234(23):4682–4694. <https://doi.org/10.1177/0954406220927069>.
11. Žak S., Woźniak D. Controlling the State of Residual Stresses in Railway Rails by Modifying Pass Design of Straightening Rollers. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2023;68(1):57–70. <https://doi.org/10.24425/amm.2023.141473>.
12. Talamini B., Gordon J., Perlman A. B. Finite Element Estimation of the Residual Stresses in Roller-Straightened Rail. *Proceedings of the ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Rail Transportation. Anaheim, California, 13–19 November, 2004, USA*. p. 123–131. <https://doi.org/10.1115/IMECE2004-61850>.
13. Thadsoongnoen K., Hasap A., Noraphaiphapaksa N., Kanchanomai C. Numerical Investigation of Residual Stress Formation Mechanisms in Flash-Butt Welded Rail. *Metals*. 2023; 13(8):1359. <https://doi.org/10.3390/met13081359>.
14. Kelleher J., Prime M. B., Buttler D., Mummery P. M., Webster P. J., Shackleton J., Withers P. J. The measurement of residual stress

in railway rails by diffraction and other methods. *Journal of Neutron Research*. 2003;11(4):187–193. <https://doi.org/10.1080/10238160410001726602>.

15. Jun T. S., Hofmann F., Belnoue J., Song X., Hofmann M., Korsunsky A. M. Triaxial residual strains in a railway rail measured by neutron diffraction. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2009;44(7):563–568. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA545>.

16. Sasaki T., Takahashi S., Kanematsu Y., Satoh Y., Iwafuchi K., Ishida M., Morii Y. Measurement of residual stresses in rails by neutron diffraction. *Wear*. 2008;265(9–10):1402–1407. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.047>.

17. Mortazavian E., Wang Z., Teng H. Measurement of Residual Stresses in Laser 3D Printed Train Rail using X-Ray Diffraction Technique. *Proceedings of the ASME 2021 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 2A: Advanced Manufacturing, 1–5 November, 2021*. P. 9. <https://doi.org/10.1115/IMECE2021-69822>.

18. Oliveira B. S., Rodrigues L. A. S., Costa E. S., Braga E. M., Reis M. A. L. X-ray diffraction analysis of residual stresses in the premium rails welded by flash butt process. *Soldagem & Inspeção*. 2020;25(26):1–9. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI25.29>.

19. Hwang Y.-I., Kim G., Kim Y.-I., Park J.-H., Choi M. Y., Kim K.-B. Experimental Measurement of Residual Stress Distribution in Rail Specimens Using Ultrasonic L_{CR} Waves. *Applied Sciences*. 2021;11(19):9306. <https://doi.org/10.3390/app11199306>.

20. Prime M. B. Cross-Sectional Mapping of Residual Stresses by Measuring the Surface Contour After a Cut. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2001;123(2):162–168. <https://doi.org/10.1115/1.1345526>.

21. Johns T. G., Sampath S. G., Bell J. C., Davies K. B. Engineering Analysis of Stresses in Railroad Rails. *U.S. Department of Transportation. FRA/ORD-81/51. Final Report*. 1981. 414 p.

22. Сакало В. И., Сакало А. В. Определение остаточных напряжений в железнодорожном рельсе методом электротензометрии // Шестой научно-технический семинар «Компьютерное моделирование на железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ», Брянск, 9–13 сентября 2024. Брянск: БГТУ, 2024. С. 78–81. EDN: <https://www.elibrary.ru/hmwulp>.

Sakalo V. I., Sakalo A. V. Determination of residual stresses in a rail by electrotensometry. In: *Sixth scientific and technical workshop “Computer simulation in railway transport: dynamics, strength, wear”, 9–13 September 2024, Bryansk*. Bryansk: BSTU; 2024. p. 78–81 (In Russ.). EDN: <https://www.elibrary.ru/hmwulp>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Владимир Иванович САКАЛО,

д-р техн. наук, профессор, Брянский государственный технический университет (БГТУ, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7), Author ID: 174319, <https://orcid.org/0009-0008-7747-581X>

Алексей Владимирович САКАЛО,

канд. техн. наук, доцент, кафедра производства и сервиса в транспортном машиностроении, Брянский государственный технический университет (БГТУ, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, д. 7), Author ID: 556528, <https://orcid.org/0000-0002-9137-9620>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir I. SAKALO,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Bryansk State Technical University (241035, Bryansk, 7, 50th October Anni Blvd.), Author ID: 174319, <https://orcid.org/0009-0008-7747-581X>

Alexey V. SAKALO,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Production and Service in Transport Engineering, Bryansk State Technical University (241035, Bryansk, 7, 50th October Anni Blvd.), Author ID: 556528, <https://orcid.org/0000-0002-9137-9620>

ВКЛАД АВТОРОВ

Владимир Иванович САКАЛО. Обзор и анализ состояния вопроса, исследование влияния глубины вырезов вокруг тензорезистора на напряжения на расположенной между ними поверхности, подготовка и проведение экспериментальных исследований, оценка результатов, редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

Алексей Владимирович САКАЛО. Обзор и анализ состояния вопроса, исследование влияния глубины вырезов вокруг тензорезистора на напряжения на расположенной между ними поверхности, разработка и программная реализация математических моделей, подготовка и проведение экспериментальных исследований, оценка результатов, редактирование и подготовка текста статьи (50 %).

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Vladimir I. SAKALO. Review and analysis of the state of the issue, study of the influence of the depth of cutouts around the strain gauge on the stresses on the surface located between them, preparation and implementation of experimental studies, evaluation of results, article editing and preparation (50 %).

Alexey V. SAKALO. Review and analysis of the state of the issue, study of the influence of the depth of cutouts around the strain gauge on the stresses on the surface located between them, development and software implementation of mathematical models, preparation and implementation of experimental studies, evaluation of results, article editing and preparation (50 %).

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The authors have read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию 10.01.2025, рецензия от первого рецензента получена 21.01.2025, рецензия от второго рецензента получена 25.02.2025, рецензия от третьего рецензента получена 27.02.2025, принята к публикации 24.04.2025.

The article was submitted 10.01.2025, first review received 21.01.2025, second review received 25.02.2025, third review received 27.02.2025, accepted for publication 24.04.2025.