

УДК 620.179

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-4-26-32

Критерий определения допустимого напряженного состояния рельса

К. А. Тапков, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

С помощью математического моделирования и экспериментального исследования подтверждена линейная зависимость между средневзвешенным уровнем остаточных напряжений по высоте рельса, оцениваемых методом акустической тензометрии, и расхождением паза в шейке рельса, прорезанного согласно п. 7.14 ГОСТ 51685–2013, коэффициент корреляции составил 0,94. Методом регрессионного анализа было определено, что чувствительность расхождения паза к уровню остаточных напряжений совпадает для различных плавок с учетом погрешностей и составляет минус 0,032, однако постоянная составляющая различна для различных плавок рельса. Оценку значения постоянной составляющей предполагается вести по результатам проведенных испытаний остаточных напряжений разрушающими методами (разрезкой рельса) согласно 7.14 ГОСТ 51685–2013. После оценки постоянной составляющей для каждой из плавок рельсов может быть получена зависимость, описывающая расхождение паза в зависимости от уровня остаточных напряжений. При расхождениях паза, не превышающих 2 мм, напряженное состояние рельса признается соответствующим ГОСТ 51685–2013, прогнозируемое расхождение паза вычисляется по приведенной в статье зависимости. Экспериментальная оценка остаточных напряжений проводилась с использованием ЭМА-способа ввода приема волн и эффекта акустоупругости. Математическое моделирование проводилось методом конечных элементов с использованием среды Comsol Multiphysics. Размер конечных элементов адаптивный, размер элемента лежит в диапазоне от 0,2 до 3 мм. Для имитации остаточных напряжений к рельсу были приложены распределенные нагрузки, имеющие градиентный характер, выбранный таким образом, чтобы при заданном уровне напряжений по элементам рельса переход напряжений имел плавный характер.

Ключевые слова: математическое моделирование, рельс, акустоупругость, остаточные напряжения, критерий.

Введение

Безопасная эксплуатация железнодорожных путей и организация безопасных железнодорожных перевозок имеет важнейшее значение вследствие возрастания интенсивности грузоперевозок, пассажирского потока и скоростей движения подвижного состава. Очевидно, что весомую роль в обеспечении безопасной эксплуатации имеют рельсы. На разрушение и развитие дефектов в рельсах оказывают влияние остаточные напряжения, возникающие во время производства рельсов, монтажа рельсов в путь, а также во время эксплуатации [1–8]. Остаточные напряжения при производстве рельсов возникают вследствие неравномерности охлаждения внутренних и внешних слоев рельса [9–13]. В настоящее время уровень напряжений контролируется на ограниченной выборке разрушающими методами (как правило, согласно ГОСТ 51685–2013 выборка составляет 1 %). Вырезается часть рельса, имеющая длину 0,6 м, после чего прорезается паз на 2/3 длины и шириной 6 мм. В случае расхождения прорезанного в рельсе паза на величину не более 2 мм уровень остаточных напряжений признается допустимым. В то же время современные методы акустической тензометрии позволяют оценивать

неразрушающими методами напряженное состояние объекта контроля, в том числе внутренних слоев объекта [14–18].

Главным недостатком применяемой методики контроля с использованием разрушающих методов является распространение результатов, полученных на одном рельсе, на партию рельсов в 100 шт. В то же время даже в пределах одного рельса уровень остаточных напряжений может претерпевать значительные изменения.

Вопрос контроля уровня остаточных напряжений в рельсах разрабатывался в работах [19–21], где предпринимались попытки установить связь напряжений со скоростью распространения ультразвуковой волны, в [22, 23] описаны исследования по применению пьезоэлектрических преобразователей для ввода волн и дальнейшей оценки связи параметров волны и напряженного состояния. Также существуют исследования по изменению спектра возбуждаемых сигналов при прохождении подвижного состава [24], использование электрохимического способа измерения внутренних напряжений [25].

Таким образом, цель работы – доработка экспериментального критерия о соответствии уровня остаточных напряжений первого рода в рельсе п. 7.14 ГОСТ 51685–2013.

Методические подходы

Экспериментальные исследования проводились с использованием прибора СЭМА (госреестр № 61957-15), электромагнитно-акустического (ЭМА) датчика и эффекта акустоупругости. Для контроля были использованы сдвиговые *SH*-волны, поляризация которых была взаимно перпендикулярна. Ввод-прием волны осуществлялся с использованием ЭМА-датчика. Погрешность оценки напряжений составила 5 МПа.

Согласно [26], принято допущение о том, что напряжения, находящиеся в плоскости сечения рельса и параллельные подошве рельса, пренебрежимо малы по сравнению с напряжениями, направленными вдоль оси рельса параллельно подошве. В таком случае напряжения, находящиеся в плоскости сечения рельса и направленные параллельно подошве, можно принять равными нулю. Тогда формула для расчета напряжений, направленных вдоль оси рельса, имеет следующий вид:

$$\sigma = D \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right), \quad (1)$$

где t_1 и t_2 – время распространения взаимно перпендикулярных объемных волн в объекте контроля, с; D – коэффициент акустоупругой связи, получен экспериментально в предыдущих исследованиях [27] и имеет значение минус 145 ГПа.

Зависимость между напряжениями, полученными методом акустической тензометрии и напряжениями по элементам рельса может быть описана по формуле [28]:

$$\sigma_{int} = \frac{\sigma_h \cdot H_h + \sigma_w \cdot H_w + \sigma_b \cdot H_b}{H_h + H_w + H_b}, \quad (2)$$

где σ_{int} – напряжение, определенное по результатам экспериментальных исследований, МПа; σ_h , σ_w , σ_b – напряжения в элементах рельса (головка, шейка, подошва), МПа; H_h , H_w , H_b – длины элементов (головка, шейка, подошва), мм.

Проведение предварительного эксперимента по исследованию напряженного состояния элементов рельса

Для исследования распределения напряженного состояния по элементам рельса и была проведена разрезка рельса на головку, шейку и подошву, результаты описывались в [29] и

представлены в формулах (3) и (4). Объем выборки составил 5 рельсов производства ЕВРАЗ ЗСМК и ЧМК «Мечел» [30]. Результаты эксперимента показали одинаковый характер распределения остаточных напряжений в элементах каждого из рельсов. Для проведения моделирования результаты экспериментального исследования по рельсам были усреднены, напряжение в шейке рельса было принято за σ_w , в головке рельса – σ_h , в подошве рельса – σ_b . В таком случае соотношения между напряжениями составили:

$$\sigma_h = 0,638\sigma_w, \quad (3)$$

$$\sigma_b = -0,863\sigma_w. \quad (4)$$

При проведении эксперимента было принято допущение об однородности остаточных напряжений первого рода по каждому элементу (головка, шейка, подошва) рельса. Каждое измерение было проведено 5 раз, доверительная вероятность была принята за 0,95, в таком случае, учитывая приборную и случайную составляющую, погрешность оценки напряжений составила ± 5 МПа.

Проведение конечно-элементного моделирования

Конечно-элементное моделирование с использованием элементов теории упругости проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics. Было введено 0-е приближение о бездефектной структуре рельса, также в качестве граничных условий была введена прямолинейность рельса, отклоняющаяся не более, чем регламентируется ГОСТ 51685–2013. Размер конечных элементов адаптивный, размер элемента лежит в диапазоне от 0,2 до 3 мм. Для имитации остаточных напряжений к рельсу были приложены распределенные нагрузки, имеющие градиентный характер, выбранный таким образом, чтобы при заданном уровне напряжений по элементам рельса переход напряжений имел плавный характер. Прогнозируемая погрешность модели не более 5 %. Распределение напряжений по элементам было принято соответственно (3) и (4).

На рис. 1 представлены результаты моделирования расхождения паза в рельсе при значении непосредственно расхождения $d = 2$ мм (рис. 1).

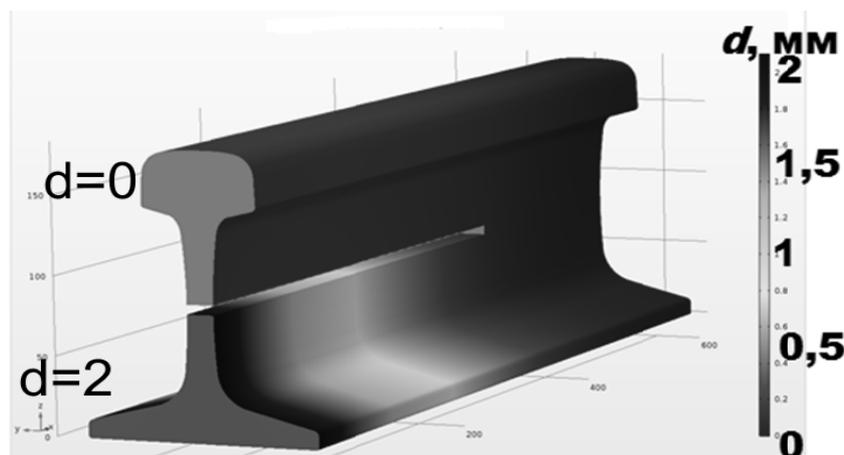


Рис. 1. Расхождение паза d в рельсе
Fig. 1. Notch discrepancy d in the rail

Результаты моделирования при различном уровне напряжений в элементах рельса и расчет средневзвешенного значения напряжения по формуле (2) представлены в таблице.

Результаты моделирования расхождения при различных значениях напряженного состояния элементов рельса

Simulating results of notch discrepancy in case of different stress state of rail elements

Расхождение паза, мм	Головка, МПа	Шейка, МПа	Подошва, МПа	Сечение рельса (расчет), МПа
0,67	-25	-40	34	-24
1,00	-37	-60	51	-36
1,32	-49	-80	68	-49
1,63	-62	-100	85	-61
2,01	-77	-125	107	-77
2,23	-86	-140	119	-86
2,53	-98	-160	136	-99

Таким образом, по результатам моделирования было подтверждено утверждение о линейном характере зависимости расхождения паза от напряженного состояния элементов рельса.

Экспериментальное исследование расхождения паза и доработка критерия

Экспериментальное исследование проводилось с использованием структуроскопа СЭМА с ЭМА-способом ввода-приема волн [31]. Исследование проводилось на трех плавках рельсов К278 (4 рельса), К277 (2 рельса), К354 (3 рельса) ЕВРАЗ ЗСМК, результаты эксперимента представлены на рис. 2. Результирующая погрешность определения напряжений 5 МПа, погрешность измерения паза 0,05 мм. По оси абсцисс представлено расхождение паза, по оси

ординат – средневзвешенное значение напряжения, определенное методом акустической тензометрии, остаточные напряжения носят сжимающий характер, график представлен на рис. 2.

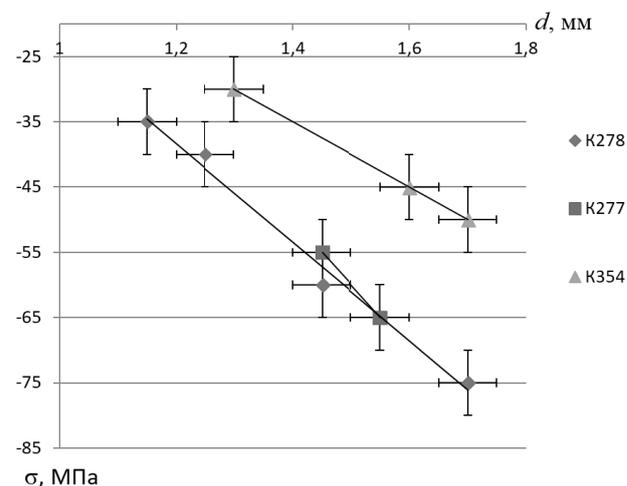


Рис. 2. График зависимости напряжений σ со стороны поверхности катания σ в зависимости от расхождения паза в рельсе d

Fig. 2. Correlation between stresses σ , measured from rolling surface, and notch discrepancy d

Результаты экспериментального исследования подтвердили наличие линейной зависимости между расхождением паза и уровнем остаточных напряжений в рельсе. Также по результатам экспериментального исследования был сделан вывод о совпадающем (с учетом погрешностей) тангенсе угла наклона (чувствительность расхождения паза в шейке к уровню остаточных напряжений) линейных зависимостей при различной постоянной составляющей. Эти положения легли в разработку критерия, позволяющего оценить уровень расхождения паза в соответствии с уровнем остаточных напряжений, определенных экспериментально.

Методом регрессионного анализа полученных зависимостей было получено следующее выражение:

$$d = -0,0132 \cdot \sigma + b, \quad (5)$$

где минус 0,0132 – чувствительность расхождения паза к уровню остаточных напряжений, мм/МПа; d – расхождение паза, мм; σ – уровень средневзвешенных остаточных напряжений, определенных экспериментально, МПа; b – постоянная составляющая, мм. Постоянная составляющая вычисляется для каждой партии рельсов по результатам разрушающих испытаний, проводимых по п. 7.14 ГОСТ 51685–2013. Результаты применения данной зависимости для экспериментальных данных показаны на рис. 3, остаточные напряжения носят сжимающий характер.

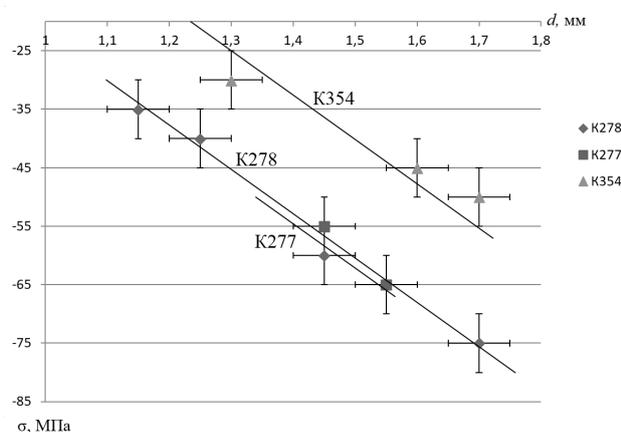


Рис. 3. Применение полученной зависимости для прогнозирования расхождения паза d в зависимости от уровня остаточных напряжений σ

Fig. 3. Approximation for projected notch discrepancy d for different values of stress σ

Обсуждение результатов

Примененная для плавки рельсов K277, K278, K354 зависимость (5) подтвердила гипотезу об одинаковой чувствительности расхождения паза к уровню остаточных напряжений. Все линейные зависимости, представленные на рис. 3, не выходят за пределы полученной погрешности оценки остаточных напряжений и расхождения паза. В то же время по представленным графикам очевидно различие постоянного коэффициента b для разных плавки. Использование одинакового значения коэффициента для разных плавки вызовет выход линейной зависимости за пределы погрешностей расхождения паза и остаточных напряжений. Таким образом, подтверждается утверждение о разном значении постоянной составляющей

в зависимости расхождения паза от средневзвешенного значения напряжений по высоте рельса. Линейный характер зависимости дополнительно подтвержден моделированием, результаты которого представлены в таблице.

Таким образом, чувствительность расхождения паза к средневзвешенному уровню остаточных напряжений – величина постоянная, равная минус 0,032 мм/МПа. Оценку коэффициента b для плавки возможно проводить с использованием разрушающих методов по п. 7.14 ГОСТ 51685–2013. Изначально в рельсе измеряется уровень средневзвешенных остаточных напряжений по высоте рельса, для чего предлагается использование ЭМА-датчика ввода-приема волны с поверхности катания и вычисления уровня остаточных напряжений σ по формуле (1), после чего проводится вырезка отрезка рельса длиной 600 мм и рез паза согласно п. 7.14 ГОСТ 51685–2013, с помощью штангенциркуля с ценой деления 0,05 мм измеряется расхождение паза d . Коэффициент b в таком случае вычисляется по формуле

$$b = 0,0132 \cdot \sigma + d. \quad (6)$$

Выводы

1. Проведенное конечно-элементное моделирование, а также данные экспериментального исследования подтвердили обратную линейную зависимость расхождения паза и средневзвешенных напряжений по сечению рельса. Средний коэффициент корреляции составил 0,94.

2. Данные экспериментального исследования показали совпадение чувствительности зависимостей между значениями остаточных напряжений и расхождением прорезанного в рельсе паза в пределах погрешности измерения. В то же время зависимости разных плавки рельсов различаются постоянной составляющей.

3. Проведенный регрессионный анализ позволил вывести выражение для связи между расхождением паза и уровнем остаточных напряжений. Так, зависимость представляет собой следующий вид: $d = -0,0132 \cdot \sigma + b$. Для вычисления коэффициента постоянной составляющей необходимо провести одно разрушающее испытание рельса по методике, описанной в п. 7.14 ГОСТ 51685–2013. В дальнейшем расхождение паза в рельсе может быть рассчитано по полученной зависимости. При расчетном расхождении паза на величину не более 2 мм уровень остаточных напряжений в рельсе признается соответствующим ГОСТ 51685–2013.

Библиографические ссылки

1. *Щепотин Г. К.* Прогнозирование отказов рельсов и аварийных ситуаций // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 4(51). С. 5–11.
2. *Покровский А. М., Третьяков Д. Н.* Численное моделирование температурно-структурного состояния железнодорожного рельса при его закалке // Наука и образование. 2015. № (7): 1–13. DOI:10.7463/0715.0786138.
3. Моделирование воздушоструйной закалки с печного нагрева железнодорожных рельсов / К. В. Волков, Е. В. Полевой, М. В. Темлянец, О. П. Аткинова, А. М. Юнусов, А. Ю. Сюсюкин // Вестник СибГИУ. 2014. № 3 (9). С. 17–23.
4. *Муравьев В. В., Тапков К. А.* Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов при изготовлении // Приборы и методы измерений. 2017. Т. 8, № 3. С. 263–270. DOI 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270.
5. *Муравьев В. В., Байтеряков А. В.* Влияние эксплуатационной грузонапряженности рельсов на акустические структурные шумы // Дефектоскопия. 2016. № 11. С. 50–58.
6. Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов методами конечных элементов и акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, И. В. Булдакова // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 1. С. 41–44.
7. *Муравьев В. В., Стрижак В. А., Хасанов Р. Р.* Особенности программного обеспечения аппаратного комплекса для акустической тензометрии и структуроскопии металлоизделий // Интеллектуальные системы в производстве. 2016. № 2(29). С. 71–75.
8. Оценка накопления дефектов при усталости акустическим методом / В. В. Муравьев, Л. Б. Зуев, К. Л. Комаров [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1994. № 4. С. 103–107.
9. *Муравьев В. В., Бояркин Е. В.* Неразрушающий контроль структурно-механического состояния рельсов текущего производства по скорости ультразвуковых волн // Дефектоскопия. 2003. № 3. С. 24–33.
10. *Величко Д. В., Севостьянов А. А., Антерейкин Е. С.* / Оценка надежности рельсов на участках Транссибирской магистрали // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2019. № 1 (48). С. 5–11.
11. Markovic N., Brajovic L., Malovic M. Methods for determination of residual stress in rail // XVIII Scientific-expert conference on Railways RAILCON'18. 11-12th of October, 2018, Nis. 2018. Pp. 113-116.
12. Mandal, Nirmal, Lees, Mitchell. An investigation into monitoring rail stress in continuously welded rails through stress-free temperature // Conference on railway Engineering, At Melbourne Australia, May 2016. 2016. Pp. 43-49.
13. *Муравьев, В. В., Тапков К. А., Леньков С. В.* Неразрушающий контроль внутренних напряжений в рельсах при изготовлении с использованием метода акустоупругости // Дефектоскопия. 2019. № 1. С. 10–16. DOI 10.1134/S01303082190100020.
14. Связь внутренних напряжений и механических свойств дифференцированно-упрочненных рельсов с параметрами акустических волн / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, Л. В. Гущина // Сталь. 2018. № 10. С. 64–67.
15. *Муравьев В. В., Тапков К. А., Леньков С. В.* К вопросу контроля остаточных напряжений в дифференцированно термоупрочненных рельсах // Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 3–9. DOI 10.1134/S0130308218100019.
16. *Муравьев В. В., Булдакова И. В., Гущина Л. В.* К вопросу об акустической структуроскопии сварных соединений рельсов // Сварка и диагностика. 2017. № 6. С. 28–31.
17. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии / Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, А. Н. Курбатов, Е. С. Тенитилов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 7 (655). С. 103–109.
18. *Бехер С. А., Коломеец А. О.* Экспериментальная методика измерения динамических сил, действующих на рельсы подкранового пути в реальных условиях эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 3 (687). С. 110–118.
19. Применение продольных волн при наклонном вводе ультразвуковых колебаний для повышения эффективности дефектоскопии рельсов / А. А. Марков, В. В. Мосягин, С. Л. Молотков, Г. А. Иванов // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24. № 8 (278). С. 4–13. DOI 10.14489/td.2021.08.pp.004-013.
20. Тарабрин, В. Ф. Аппаратно-программное обеспечение мобильных средств рельсовой дефектоскопии // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23. № 12 (270). С. 34–43. DOI 10.14489/td.2020.12.pp.034-043.
21. Оценка остаточных напряжений в рельсах с использованием электромагнитно-акустического способа ввода-приема волн / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, В. Е. Громов, А. М. Глезер // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 12. С. 34–37.
22. *Смирнов А. Н., Муравьев В. В., Абабков Н. В.* Разрушение и диагностика металлов. Москва ; Кемерово : Инновационное машиностроение, 2016. 479 с. (Техническое диагностирование). ISBN 9785990830257.
23. *Смирнов А. Н., Муравьев В. В., Фольмер С. В.* Структурно-фазовое состояние и ресурс длительно работающего металла технических устройств опасных производственных объектов, перспективы дальнейшего развития методов оценки работоспособности // Контроль. Диагностика. 2009. № 1. С. 22–32.
24. Распределение остаточных напряжений при электроконтактном упрочнении бандажей локомотивных колес / В. В. Муравьев, С. Ю. Петров, А. В. Платунов [и др.] // Технология машиностроения. 2011. № 9. С. 42–45.
25. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, В. А. Куликов // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 12–20.

26. Связь глубины обезуглероженного слоя в рельсах со скоростью рэлеевских волн и коэрцитивной силой / В. В. Муравьев, А. В. Байтеряков, С. В. Ленков, В. А. Захаров // *Сталь*. 2017. № 8. С. 42–44.

27. Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов [и др.] // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. 2018. Т. 21. № 2. С. 13–23. DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23.

28. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, В. А. Куликов // *Дефектоскопия*. 2016. № 7. С. 12–20.

29. Исследование двухосного напряженного состояния в рельсах Р65 методом акустоупругости / В. В. Муравьев, А. В. Якимов, Л. В. Волкова, А. В. Платунов // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2019. Т. 17. № 1. С. 19–25. – DOI 10.22213/2410-9304-2019-1-19-25.

30. *Муравьев В. В., Якимов А. В., Казанцев С. В.* Распределение остаточных напряжений и скорости головной волны в рельсах // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019. Т. 16, № 3. С. 370–376. DOI 10.25712/ASTU.1811-1416.2019.03.013.

31. Влияние наработки рельсов на скорость поверхностных и головных ультразвуковых волн / В. В. Муравьев, А. В. Байтеряков, А. М. Глезер, В. Е. Громов // *Деформация и разрушение материалов*. 2017. № 11. С. 42–47.

References

1. Shchepotin G.K. [Prediction of rail failures and emergency situations]. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshenia*. 2019. Vol. 51, no. 4. Pp. 5-11 (in Russ.).

2. Pokrovskiy A.M., Tretyakov D.N. [Numerical simulating of thermal structure state of rail during its hardening]. *Nauka I obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman*. 2015, no. 7, pp. 1-13. DOI 10.7463/0715.0786138 (in Russ.).

3. Volkov K.V., Polevoj E.V., Temljancev M.V., Atkonova O.P., Yunusov A.M., Syusyukin A.Y. [Simulation of an air-hardening from furnace heating of railway lines]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2014. Vol. 9, no. 3. Pp. 17-23 (in Russ.).

4. Muravev V.V., Tapkov K.A. [Evaluation of Strain-Stress State of the Rails in the Production]. *Pribory i metody izmerenij*. 2017. Vol. 8, no. 3. Pp. 263-270. DOI 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270 (in Russ.).

5. Murav'ev V.V., Baiteryakov A.V. [Effect of traffic volume on acoustic structural noises in rails]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. Vol. 52, no. 11. Pp. 657-663. DOI 10.1134/S1061830916110073 (in Russ.).

6. Muravev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Buldakova I.V. [Determination of internal stresses in rails by methods of finite elements and acoustoelasticity]. *Deformatsia I razrushenie materialov*. 2017. No. 1. Pp. 41-44 (in Russ.).

7. Muravev V.V., Strizhak V.A., Hasanov R.R. [Features of the software for the hardware-based system of acoustic tensometry and structural inspection of metal products]. *Intellektualnie sistemy v proizvodstve*. 2016. No. 2. Pp. 71-75 (in Russ.).

8. Muravev V.V., Zuev L.B., Kharitonov V.B., Chaplygin V.N. [Estimation of defect collection during fatigue by acoustic method]. *Problemy mashinostroenia I nadezhnosti mashin*. 1994. No. 4. Pp. 103-107 (in Russ.).

9. Murav'ev V.V., Boyarkina E.V. [Nondestructive testing of the structural-mechanical state of currently produced rails on the basis of the ultrasonic wave velocity]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2003. Vol. 39, no. 3. Pp. 189-197. DOI 10.1023/B:RUNT.0000009071.94892.15 (in Russ.).

10. Velichko D.V., Sevostyanov A.A., Antereykin E.S. [Assessment of rails reliability on the sections of the trans-siberian railway]. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshenia*. 2019. No. 1. Pp. 5-11 (in Russ.).

11. Markovic N., Brajovic L., Malovic M. Methods for determination of residual stress in rail. In XVIII Scientific-expert conference on Railways RAILCON'18. 11-12th of October, 2018, Nis. 2018. Pp. 113-116.

12. Mandal, Nirmal, Lees, Mitchell. An investigation into monitoring rail stress in continuously welded rails through stress-free temperature. In Conference on railway Engineering, At Melbourne Australia, May 2016. 2016. Pp. 43-49.

13. Muravev V.V., Lenkov S.V., Tapkov K.A. [In-Production Nondestructive Testing of Internal Stresses in Rails Using Acoustoelasticity Method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. Vol. 55. No. 1. Pp. 8-14. DOI 10.1134/S1061830919010078.

14. Muraviev V.V., Volkova L.V., Platunov A.V., Gushchina L.V. [Acoustic assessment of the internal stress and mechanical properties of differentially hardened rail]. *Steel in Translation*. 2018. Vol. 48. No. 10. Pp. 690-694. DOI: 10.3103/S0967091218100078.

15. Murav'ev V.V., Tapkov K.A., Len'kov S.V. [On the Question of Monitoring Residual Stresses in Selectively Heat-Strengthened Rails]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. Vol. 54, Issue 10, pp. 675-681. ISSN 1061-8309. DOI: 10.1134/S106183091810008X.

16. Muravev V.V., Buldakova I.V., Gushchina L.V. [On the question about acoustic structoroscropy of rail weld connections]. *Svarka I diagnostika [Welding and diagnostics]*, 2017, no. 6, pp. 28-31 (in Russ.).

17. Stepanova L.N., Beher S.A., Kurbatov A.N., Tenitilov E.S. [Mechanical strains condition investigation in rails by means of acoustic elasticity and strain measurement]. *Izvestia vishih uchebnih zavedenij. Stroitel'stvo*. [News of higher education. Construction], 2013, no. 7, vol. 655, pp. 103-109 (in Russ.).

18. Bekher S.A., Kolomeets A.O. [Development of methodology for determining the dynamic force by the strain gauge system]. *Izvestia vishih uchebnih zavedenij. Stroitel'stvo*. [News of higher education. Construction], 2016, no. 3, vol. 687, pp. 110-118 (in Russ.).

19. Markov A.A., Mosyagin V.V., Molotov S.L., Ivanov G.A. [Application of inclined longitudinal ultrasonic

waves to improve the efficiency of rail flaw detection] *Kontrol', Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2021, Vol. 24, no. 8, pp. 4-13. DOI 10.14489/td.2021.08.pp.004-013

20. Tarabrin V.F. [Hardware and software for mobile rail inspection tools]

Kontrol', Diagnostika [Control. Diagnostics], 2020, Vol. 23, no. 12, pp 34-43. DOI 10.14489/td.2020.12.pp.034-043 (in Russ.).

21. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Gromov V.E., Glezer A.M. [Estimation of the residual stresses in rails using electromagnetic-acoustic introduction-reception of waves]. *Russian metallurgy (Metally)*. 2016. No. 10. Pp. 992-995. DOI 10.1134/S003602951610013X.

22. Smirnov A.N., Muravev V.V., Ababkov N.V. *Razrushenie i diagnostika metallov* [Fracture and diagnostics of metals]. Moscow-Kemerovo: Innovative machine making publishing, 2016, 479 p. (in Russ.). ISBN 9785990830257.

23. Smirnov A.N., Muravev V.V., Folmer S.V. [Structurally phase state and resource of long-term working metal of technical devices of dangerous industrial objects. prospects of the further development of the working capacity estimation methods]. *Kontrol', diagnostika* [Proc. Control, diagnostics], 2009. No. 1. Pp. 22-32 (in Russ.).

24. Muravev V.V., Petrov S.Yu., Platonov A.V., Balabanov E.N., Volkova L.V., Ryabov A.A., Sokolov O.V., Pechenova T.P., Kostuk V.V. [Distribution of residual stresses during electrocontact hardening of rail wheel bandage ring]. *Tehnologia mashinostroenia* [Technology of machine making], 2011, no. 9, pp 42-45 (in Russ.).

25. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platonov A.V., Kulikov V.A. [An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. Vol. 52. No 7. Pp. 370-376. DOI 10.1134/S1061830916070044.

26. Murav'ev V.V., Baiteryakov A.V., Len'kov S.V., Zakharov V.A. [Correlation of rail structure with the Rayleigh-wave velocity and the coercive force]. *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. No. 8. Pp. 561-563. DOI 10.3103/S0967091217080125.

27. Muravev V.V., Volkova L.V., Platonov A.V., Buldakova I.V., Gischina L.V. [Investigations of the structural and strain-stress state of the rails of current production by the acoustic elasticity method]. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU]. 2018. Vol. 21, no. 2. Pp. 13-23. DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23 (in Russ.).

28. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platonov A.V., Kulikov V.A. [An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. Vol. 52. No. 7. Pp. 370-376. DOI 10.1134/S1061830916070044.

29. Muravev V.V., Yakimov A.V., Volkova L.V., Platonov A.V. [Investigation of biaxial stress state in R65 rails by acoustoelasticity method] *Intellektualnie sistemy v proizvodstve*. 2019. Vol. 17, no. 1. Pp. 19-25. DOI 10.22213/2410-9304-2019-1-19-25 (In Russ.).

30. Muravev V.V., Volkova L.V., Platonov A.V., Buldakova I.V. [Determination of internal stresses in rails by methods of finite elements and acoustoelasticity]. *Deformatsiya i razrushenie materialov* [Deformation and material destruction], 2017, no. 1. Pp. 41-44 (in Russ.).

31. Smirnov A.N., Muravev V.V., Folmer S.V. [Structurally phase state and resource of long-term working metal of technical devices of dangerous industrial objects. prospects of the further development of the working capacity estimation methods]. *Kontrol', diagnostika* [Control, diagnostics], 2009. No. 1. Pp. 22-32.

Acceptable Residual Stresses Value Criteria for Rail Stress State

K. A. Tapkov, Engineer, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

According to simulating and experimental research, the negative linear relation between the level of residual stresses, assessed by the method of acoustic tensometry, and the divergence of the notch in the rail cut in accordance with clause 7.14 of GOST 51685-2013, was found. The correlation coefficient is 0.94. It was determined by the method of regression analysis that the sensitivity of inclination of the notch is the same for different rail casts with account of the measuring errors and it is minus 0.032, but the constant component of the expression is different for different casts of the rail. The constant component should be assessed according to the results of the tests of residual stresses by destructive methods (cutting the rail) in accordance with 7.14 GOST 51685-2013. After evaluating the constant component for each of the rail casts, the dependence can be obtained that describes the notch divergence depending on the level of the measured residual stresses. When the discrepancy of the notch does not exceed 2 mm, the stress state of the rail is acceptable by GOST 51685-2013; the predicted notch discrepancy of the notch is calculated according to the dependence given in the paper. Experimental evaluation of residual stresses was carried out using the EMA method of wave input-reception and the acoustoelasticity effect. Mathematical modeling was carried out by the finite element method using the Comsol Multiphysics environment. The size of the finite elements is adaptive, the size of the element ranges from 0.2 mm to 3 mm. To simulate residual stresses, distributed loads with a gradient character were applied to the rail, selected so that at a given level of stress across the rail elements, the stress transition had a smooth character.

Keywords: simulating, rail, acoustoelasticity, residual stresses, criteria.

Получено: 09.11.2021