

УДК 620.179.16

DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-78-83

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННО ТЕРМОУПРОЧНЕННЫХ РЕЛЬСОВ

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

Одной из наиболее часто встречающихся причин разрушения рельсов является высокое значение остаточных напряжений. В процессе производства рельсов остаточные напряжения могут возникать в процессе прокатки, термообработки, правки и рихтовки. В настоящее время приемо-сдаточные испытания включают в себя контроль по измерению расхождения паза рельса после прорезания шейки рельса на глубину 600 мм, а также измерение остаточных напряжений в подошве рельса до и после вырезки темплета с наклеенным тензодатчиком.

В данной работе рассмотрен вопрос о связи значений расхождения паза и напряжения в подошве с остаточными напряжениями в отдельных элементах рельса, полученных методом акустической тензометрии. Для выявления данной зависимости было выполнено разрезание рельса на отдельные элементы (головка, шейка, подошва), после чего в каждом элементе было проведено измерение напряжений методом акустической тензометрии. Моделирование проводилось методом конечных элементов в программной среде Comsol Multiphysics. По результатам моделирования и экспериментальных исследований предлагается браковочный критерий для контроля остаточных напряжений в случае прозвучивания сечения рельса со стороны поверхности катания: полученные значения сжимающих напряжений должны находиться в пределах $\sigma_{\text{ин}} = -52 \dots -80$ МПа.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, акустоупругость, рельс, напряженно-деформированное состояние, моделирование, остаточные напряжения.

Введение

Огромное значение в безопасности эксплуатации железнодорожного транспорта имеет надежность железнодорожного пути, основную нагрузку которого несут рельсы. Одной из наиболее часто встречающихся причин разрушения рельсов является высокое значение остаточных напряжений. В области острых трещин такие напряжения вследствие концентрации могут достигать предела текучести [1–4], что приводит к ускоренному развитию дефектов и значительно снижает срок безопасной эксплуатации [5–7]. Определение уровня остаточных напряжений в рельсах позволяет получить данные о текущем состоянии. В процессе производства рельсов остаточные напряжения могут возникать в процессе прокатки, термообработки (из-за разности скоростей охлаждения), правки и рихтовки [8, 9].

Множество факторов, влияющих на остаточные напряжения в каждом элементе рельса, вызывает необходимость исследования распределения напряжений в сечении и по разным сечениям разных выборок для разработки обоснованного браковочного критерия.

Целью работы является моделирование уровня внутренних напряжений в элементах рельса и разных сечениях рельсов и связи их с расхождением паза после разрезки, а также со значением остаточных напряжений в подошве рельса.

Экспериментальная оценка остаточных напряжений в рельсе и его элементах до и после разрезания

Для определения характера распределения напряжений по элементам рельса (головка, шейка, подошва) было проведено разрезание рельса на отдельные составляющие, что схематично показано на рис. 1. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния рельсов было проведено методом акустоупругой тензометрии [10–13], в основе которого лежит изменение скорости акустических волн в зависимости от напряженного состояния [14]. Прозвучивание рельса производилось в направлении от поверхности катания двумя поперечными волнами, поляризованными во взаимно перпендикулярных плоскостях, одна из которых располагалась вдоль оси рельса (по его длине), вторая – по вертикальному сечению рельса [15].

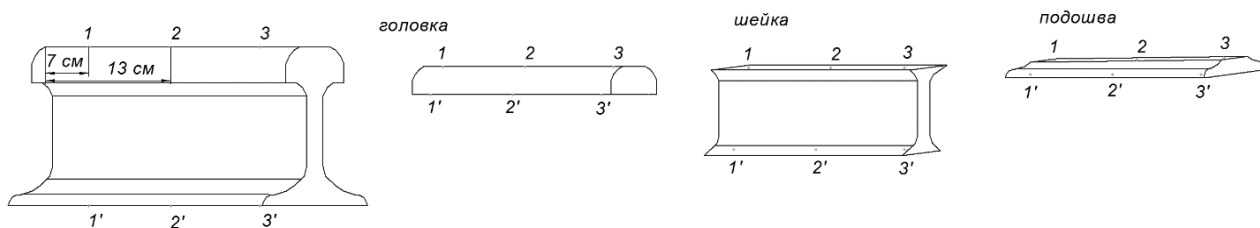


Рис. 1. Отрезок рельса, элементы: головка, шейка и подошва

Вычисление значений напряжений проводилось согласно формуле [16, 17]:

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

где $D=145$ ГПа – коэффициент акустоупругости, определенный экспериментально; t_1 – время распространения волны, поляризованной вдоль главных напряжений, с; t_2 – время распространения волны, поляризованной перпендикулярно оси главных напряжений, с.

Для возбуждения и приема двух акустических поперечных волн был применен электромагнитно-акустический (ЭМА) способ, реализованный в приборе СЭМА [18–19]. Обработка полученных экспериментально эхограмм проводилась в программной среде ПРИНЦ (св-во № 2011614594) [20]. Погрешность измерений составила 3 МПа. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1. Средние значения напряжений в элементах рельса

Элемент рельса	Напряжение, измеренные с поверхности катания рельса в отрезке и в элементах рельса, МПа
Отрезок рельса	–60
Головка	–62
Шейка	–97
Подошва	82

Полученные экспериментальные значения напряжений в элементах рельса были приняты за начальные условия при проведении моделирования напряженно-деформированного состояния рельса.

Моделирование расхождения паза в зависимости от уровня продольных напряжений

Моделирование распределения напряжений проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics. Полученные результаты были использованы для соотнесения значений напряжений в элементах рельса с расхождением паза при проведении выходного контроля согласно ГОСТ 51685–2013.

Важно заметить, что при прозвучивании сечения рельса прибором СЭМА со стороны поверхности катания полученные экспериментальные данные представляют собой интегральную характеристику распределения напряжений по сечению рельса. Это связано с изменением значения скорости акустической волны при прохождении элементов рельса. Причиной различной скорости волн по элементам выступает неоднородность напряжений по сечению рельса, в результате чего для сопоставления реальных напряжений в элементах рельса с экспериментальным значением, полученным прибором СЭМА при прозвучивании с поверхности катания, возникает необходимость использовать средневзвешенное значение. В таком случае связь между напряжениями по элементам и экспериментальным значением выражается формулой

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

где σ_{int} – значение напряжений, получаемых при прозвучивании со стороны головки рельса, МПа; $\sigma_h, \sigma_w, \sigma_b$ – напряжения, соответственно, в головке, в шейке и в подошве рельса, МПа; L_h, L_w, L_b – путь, который проходит волна в вертикальном сечении по головке, шейке и подошве рельса соответственно, мм.

Результаты моделирования по расхождению паза, значению напряжений по элементам и напряжений, получаемых прибором СЭМА при прозвучивании со стороны головки рельса, сведены в табл. 2. Расхождение паза и напряжения по элементам рельса были смоделированы в среде COMSOL, значения напряжений в отрезке рельса при прозвучивании со стороны поверхности катания были вычислены аналитически по формуле (2) согласно результатам моделирования.

Таблица 2. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния рельса

Расхождение паза, мм	Головка, МПа	Шейка, МПа	Подошва, МПа	Вычисленные значения напряжений (по формуле (2)), МПа
0,34	-12	-20	17	-12
0,51	-18	-30	25	-18
0,67	-24	-40	34	-24
0,84	-30	-50	43	-31
1,00	-37	-60	51	-37
1,16	-43	-70	60	-43
1,32	-49	-80	68	-49
1,47	-55	-90	77	-55
1,63	-61	-100	85	-62
1,78	-67	-110	94	-68
1,94	-74	-120	102	-74
2,01	-77	-125	107	-77
2,09	-80	-130	111	-80
2,23	-86	-140	119	-86
2,53	-99	-160	136	-99

Моделирование уровня критических растягивающих напряжений в подошве рельса

Моделирование уровня остаточных напряжений в подошве рельса проводилось в программной среде COMSOL Multiphysics. Полученные результаты были использованы для оценки напряженного состояния элементов рельса при критическом уровне остаточных напряжений в подошве рельса согласно ГОСТ 51685–2013 (250 МПа).

В качестве начальных условий был выбран критический уровень напряжений в поверхностном слое подошвы, результаты

моделирования распределения напряжений и нулевое смещение средней точки сечения рельса. Результаты моделирования представлены на рис. 2. и сведены в табл. 3. Значения напряжений смоделированы в программной среде COMSOL.

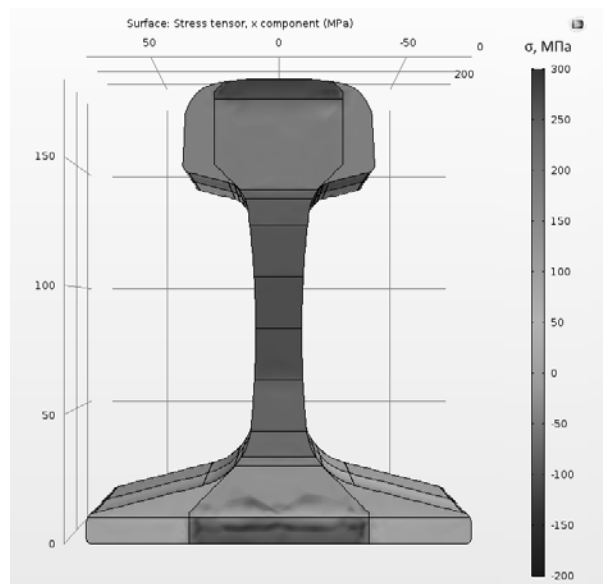


Рис. 2. График распределения напряжений в рельсе при значении растягивающих напряжений в поверхностном слое подошвы 250 МПа

Таблица 3. Средневзвешенные значения напряжений в элементах рельса при значении напряжений в подошве 250 МПа

Фрагмент рельса	Смоделированные интегральные значения напряжений, МПа
Сечение рельса	-52
Головка	-51
Шейка	-90
Подошва	89

Стоит заметить, что при прозвучивании подошвы со стороны поверхности катания значение напряжений составляет 89 МПа при наличии напряжений в поверхностном слое в 250 МПа. Это объясняется тем, что при прозвучивании результатом является интегральная характеристика напряженно-деформированного состояния элемента. В подошве рельса, по результатам моделирования (рис. 2), растягивающие в поверхностном слое (250 МПа) переходят в нулевые в месте перехода подошвы в шейку (около 0 МПа), в результате расчетное зна-

чение при прозвучивании прибором СЭМА составит 89 МПа.

Анализ результатов

Согласно ГОСТ 51585–2013 превышение значения расхождения паза в 2 мм является недопустимым, и рельс признается бракованным. По результатам моделирования (табл. 2) это соответствует уровню напряжений -77 ± 3 МПа при прозвучивании прибором СЭМА со стороны поверхности катания. Превышение (по модулю) значения в -7 ± 3 МПа согласно результатам моделирования обозначает превышение уровня расхождения паза над допустимым.

В то же время, согласно ГОСТ 51685–2013, регламентируемый уровень остаточных напряжений в поверхностном слое подошвы составляет 250 МПа. По результатам моделирования (табл. 3) остаточных напряжений в подошве рельса критический уровень в 250 МПа в поверхностном слое будет присутствовать при значении измеренных напряжений в -52 ± 3 МПа прибором СЭМА со стороны поверхности катания. Превышение критического уровня напряжений в поверхностном слое подошвы рельса (в 250 МПа) соответствует $\sigma > -52 \pm 3$ МПа при прозвучивании прибором СЭМА сечения рельса со стороны поверхности катания.

Заключение

1. В исследованном отрезке рельса результаты моделирования показали наличие связи между уровнем остаточных напряжений и значением расхождения паза (согласно ГОСТ 51685–2013). Предельное расхождение паза в 2 мм соответствует уровню остаточных напряжений до -80 МПа, измеренных методом акустической тензометрии со стороны поверхности катания рельса.

2. Результаты моделирования напряжений в подошве рельса показали наличие связи между уровнем остаточных напряжений по сечению рельса и значением напряжений в подошве (согласно ГОСТ 51685–2013). Предельный уровень растягивающих напряжений в подошве в 250 МПа соответствует уровню остаточных напряжений в -52 МПа.

3. Предложен браковочный критерий для проведения приемо-сдаточных испытаний

рельсов с помощью метода акустической тензометрии: уровень остаточных напряжений при прозвучивании сечения рельса со стороны поверхности катания должен лежать в пределах $-52 \dots -80$ МПа.

Библиографические ссылки

1. Микроструктура закаленных рельсов / В. Е. Громов, А. Б. Юрьев, К. В. Морозов, Ю. Ф. Иванов. Новокузнецк : Интер-Кузбасс, 2014. 213 с.
2. Оценка накопления дефектов при усталости акустическим методом / В. В. Муравьев, Л. Б. Зуев, К. Л. Комаров, В. Б. Харитонов, В. Н. Чаплыгин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1994. № 4. С. 103–107.
3. Муравьев В. В., Степанова Л. Н., Кареев А. Е. Оценка степени опасности усталостных трещин при акустико-эмиссионном контроле литых деталей тележки грузового вагона // Дефектоскопия. 2003. № 1. С. 63.
4. Диагностика, повреждаемость и ремонт барабанов котлов высокого давления / Н. В. Абабков, Н. И. Кашубский, В. Л. Князьков, А. Ф. Князьков, Э. В. Козлов, Н. А. Конева, Н. М. Макаров, В. В. Муравьев, Н. А. Попова, А. Н. Смирнов, С. В. Фольмер ; под ред. А. Н. Смирнова. М., 2011. 256 с.
5. Связь спектра сигналов АЭ с процессом усталостного развития трещин в металлических образцах / Л. Н. Степанова, А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, А. Л. Бобров, В. Н. Чаплыгин, Е. Ю. Лебедев, С. И. Кабанов, С. А. Катарушкин, В. Л. Кожемякин // Контроль. Диагностика. 1999. № 2. С. 5–8.
6. Муравьев В. В. Взаимосвязь скорости ультразвука в сталях с режимами их термической обработки // Дефектоскопия. 1989. № 2. С. 66–68.
7. 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.
8. Буденков Г. А., Муравьев В. В., Коробейникова О. В. Исследование напряженно-деформированного состояния ободьев цельнокатанных вагонных колес методом акустической тензометрии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2009. Т. 6. № 3. С. 111–117.
9. Sereznov A. N., Muravev V. V., Stepanova L. N., Kabanov S. I., Kozhemyakin V. L.,

Eltsov A. E., Lebedev E. Yu. Rapidly working diagnostic acoustic emission system // Дефектоскопия. 1998. № 7. С. 8–14.

10. Муравьев В. В., Бояркин Е. В. Неразрушающий контроль структурно-механического состояния рельсов текущего производства по скорости ультразвуковых волн // Дефектоскопия. 2003. Т. 9. № 3. С. 24–33.

11. Deputat J., Szelazek J., Kwaszczyńska-Klimek A. and Miernik A. Experiences in Ultrasonic Measurement of Rail Residual Stresses. O. Orringer et al. (eds.), "Residual Stress in Rails", KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1, pp. 169–183, (1992)

12. Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии / Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, А. Н. Курбатов и др. // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 7. С. 103–109.

13. Покровский А. М., Третьяков Д. Н. Численное моделирование температурно-структурного состояния железнодорожного рельса при его закалке // Наука и образование. МГТУ имени Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 7. С. 1–13.

14. Schneider E., Herzer R. Ultrasonic Evaluation of Stresses in the Rims of Railroad Wheels. NDTnet – June 1998, Vol. 3, no. 6.

15. 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.

16. Электромагнитно-акустический метод исследования напряженно-деформированного состояния рельсов / В. В. Муравьев, Л. В. Волкова, А. В. Платунов, В. А. Куликов // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 12–19.

17. Муравьев В. В., Стрижак В. А., Пряхин А. В. Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупругости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82, № 12. С. 52–57.

18. Локализация сигналов акустической эмиссии в металлических конструкциях // А. Н. Серезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова и др. // Дефектоскопия. 1997. № 10. С. 79–84.

19. Муравьев В. В., Волкова Л. В., Ланченко М. А. Ультразвуковой контроль остаточных напряжений в бандажах локомотивных колес при производстве // Дефектоскопия. 2015. № 5. С. 3–6.

20. Информационно-измерительная система возбуждения, приема, регистрации и обработки

сигналов электромагнитно-акустических преобразователей / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, С. А. Обухов, А. Б. Ефремов // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. № 1. С. 243–250.

References

1. Gromov V. E., Yur'ev A. B., Morozov K. V., Ivanov Yu. F. (2014). *Mikrostruktura zakalennogo relsa* [Microstructure of hardened rails]. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass Publ., 213 p. (in Russ.)

2. Muravev V. V., Zuev L. B., Komarov K. L., Kharitonov K. L., Chaplygin V. N. (1994). [Estimation of fatigue defect summary by acoustic method]. *Problemy mashinstroenia i nadezhnosti mashin*. [Problems of mechanical engineering and reliability of mechanisms], no. 4, pp. 103-107 (in Russ.).

3. Murav'ev V. V., Stepanova L. N., Kareev A. E. (2003). *Defektoskopiya* [Defectoscopy], no. 1, p. 63 (in Russ.).

4. Ababkov N. V., Kashubskij N. I., Knjaz'kov V. L., Knjaz'kov A. F., Kozlov Je. V., Koneva N. A., Makarov N. M., Muravev V. V., Popova N. A., Smirnov A. N., Fol'mer S. V. (2011). *Diagnostika, povrezhdaemost' i remont barabanov kotlov vysokogo davlenija*. [Testing, damaging and repairing of high pressure boilers]. Moscow, 256 p.

5. Stepanova L. N., Ser'eznov A. N., Muravev V. V., Bobrov A. L., Chaplygin V. N., Lebedev E. Ju., Kabanov S. I., Katarushkin S. A., Kozhemjakin V. L. (1999). *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], no. 2, pp. 5-8 (in Russ.).

6. Murav'ev V.V. (1989). *Defektoskopiya* [Defectoscopy], no. 2, pp. 66-68 (in Russ.).

7. Murav'ev V. V., Volkova L. V., Gromov V. E., Glezer A. M. (2015). *Deformatsiya i razrushenie materialov* [Deformation and destruction of materials], no. 12, pp. 34-37 (in Russ.).

8. Budenkov G.A., Murav'ev V.V., Korobeynikova O.V. (2009). *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovdenia* [Fundamental problem of modern materialmaking], vol. 6, no. 3, pp. 111-117 (in Russ.).

9. Serезnov A. N., Murav'ev V. V., Stepanova L. N., Kabanov S. I., Kozhemyakin V. L., Eltsov A. E., Lebedev E. Yu. (1998). *Defektoskopiya* [Defectoscopy], vol. 34, no. 7, pp. 8-14 (in Russ.).

10. Murav'ev V. V., Boyarkin E. V. (2003). *Defektoskopiya* [Defectoscopy], vol. 9, no. 3, pp. 24-33 (in Russ.).

11. Deputat J., Szelazek J., Kwaszczyńska-Klimek A. and Miernik A. (1992). Experiences in Ultrasonic Measurement of Rail Residual Stresses.

O. Orringer et al. (eds.), "Residual Stress in Rails", KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1, pp. 169-183.

12. Stepanova L. N., Beher S. A., Kurbatov A. N. (2013). *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo* [News of the universities. Construction], no. 7, pp 103-109 (in Russ.).

13. Pokrovsky A. M., Tretyakov D. N. (2015). *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana. Elektronnij zhurnal* [Science and education of Bauman MSTU. Electronic magazine], no. 07, pp. 1-13 (in Russ.)

14. Schneider E., Herzer R. Ultrasonic Evaluation of Stresses in the Rims of Railroad Wheels. NDTnet – June 1998, vol. 3, no. 6.

15. Murav'ev V. V., Volkova L. V., Platonov A. V., Buldakova I. V. (2017). *Deformacija I razrushenie materialov* [Deformation and destruction of materials], no. 1, pp. 41-44 (in Russ.).

16. Murav'ev V. V., Volkova L. V., Platonov A. V., Kulikov V. A. (2016). *Defektoskopiya* [Defectoscopy], no. 7, pp. 12-19 (in Russ.).

17. Murav'ev V. V., Strizhak V. A., Prjabin A. V. (2016). *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory laboratory. Testing of the materials], vol. 82, no. 12, pp. 52-57 (in Russ.).

18. Sereznov A. N., Murav'ev V. V., Stepanova L. N., Barabanova S. B., Kozhemyakin V. L., Kabanov S. I. (1997). *Defektoskopiya* [Defectoscopy], no. 10, pp. 79-84 (in Russ.).

19. Murav'ev V. V., Volkova L. V., Lapchenko M. A. (2015). *Defektoskopiya* [Defectoscopy], no. 5, pp. 3-16 (in Russ.).

20. Strizhak V. A., Pryabin A. V., Obuhov S. A., Efremov A. B. (2011). *Intellektualnie sistemy v proizvodstve* [Intelligence systems in production], no. 1, pp. 243-250. (in Russ.)

Strain Stress Modeling of Differential Hardening Rails

K. A. Tapkov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The most common reason of rail destruction is the high level of residual stresses. These stresses appear during the process of rolling, hardening and deformation after straightening. Nowadays rail control consists of measurements of the discrepancy of the rail after making the housing, and measurements of residual stresses in the bottom of the rail with resistive-strain sensor.

In the paper you can read about the correlation of the discrepancy of the housing and residual stresses in the bottom of the rail with residual stresses in each element of rail (top, web, bottom). For searching correlation the rail was reassembled to these elements, after that residual stresses were measured by acoustoelastic method. Modeling process took place in COMSOL Multiphysics program. According to experimental and modeling results, the criteria of rejection is proposed: residual stresses have to be in the range of -52 MPa to -80 MPa in case of measurements by acoustoelastic method from the top of the rail.

Keywords: non-destructive testing, acoustoelasticity, rail, stress-strain state, modeling, residual stresses.

Получено: 14.05.18