

УДК 620.179.16

DOI 10.22213/2410-9304-2019-1-19-25

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХОСНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В РЕЛЬСАХ Р65
МЕТОДОМ АКУСТОУПРУГОСТИ*

В. В. Муравьев, доктор технических наук, профессор, Физико-технический институт УдмФИЦ УрО РАН;
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. В. Якимов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Л. В. Волкова, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. В. Платунов, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Исследованы коэффициенты упругоакустической связи и двухосное напряженное состояние в отрезках рельсов Р65 с помощью измерений скорости поперечных и продольной волн. Измерения с помощью структуроскопа СЭМА и дефектоскопа D10 1000 проведены на девяти рельсах, один из которых изготовлен по технологии объемной закалки, остальные дифференцированно упрочненные. Измерения проведены с использованием электромагнитно-акустического (ЭМА) и пьезоэлектрического (ПЭП) преобразователей для ввода и приема соответственно поперечных и продольной волн. Преобразователи устанавливались на поверхность катания головки и на боковую поверхность шейки рельса. ЭМА-преобразователь возбуждает две поперечные волны, поляризованные в продольном и поперечном направлении рельса. Волны, отраженные от противоположной стороны образца, принимаются тем же самым преобразователем. Точно такой путь проходит продольная волна, возбуждаемая ПЭП. Полученные значения остаточных напряжений в нескольких сечениях отрезков рельсов оказались неодинаковыми как в каждом отрезке по его длине, так и существенно неодинаковыми в разных образцах, включая образцы, полученные по одной технологии. Для исследования коэффициентов упругоакустической связи k_1, k_2, k_3 из рельса вырезаны головка и подошва, которые сжимали в продольном направлении на машине «INSTRON» с нагрузкой до 240 кН. До начала испытаний по сжатию были измерены начальные значения временных задержек акустических волн. Расчет коэффициентов упругоакустической связи производился по вторым донным отражениям. Коэффициенты акустоупругой связи K_1, K_2 рассчитывались при нагружении на торцы элементов от 0 до 240 кН. Обнаружено, что продольные напряжения в рельсах выше на два порядка поперечных. Таким образом, наиболее информативным методом акустической тензометрии для определения остаточных напряжений является метод, основанный на регистрации изменения скорости распространения упругих волн, зависящих от напряженного состояния, с использованием электромагнитно-акустического (ЭМА) и пьезоэлектрического (ПЭП) преобразователей для ввода и приема соответственно поперечных и продольной волн.

Ключевые слова: коэффициенты акустоупругости, электромагнитно-акустический преобразователь, остаточные напряжения, рельс.

Введение

Наличие в рельсах остаточных напряжений, полученных при изготовлении, существенно влияет на их эксплуатационные и конструктивные свойства. Остаточные напряжения в совокупности с напряжениями от нагрузки подвижного состава могут значительно сократить срок службы изделия, приводя к развитию трещин и разрушению материала. Растягивающие и сжимающие температурные напряжения, возникающие при высоких и низких температурах, вместе с технологическими способствуют развитию трещин и тем самым снижают долговечность эксплуатирующихся рельсов [1–3].

Задача продления срока службы рельсов является актуальной и требует создания новых методов выявления внутренних напряжений, возникающих при их изготовлении и в эксплуатации и влияющих на долговечность. Значительное число работ посвящено оценке технического и напряженного состояния в металлоконструкциях и в том числе рельсах экспериментальными и теоре-

тическими методами [4–13]. Использование теории акустоупругости и возможностей возбуждения и приема упругих волн позволяет исследовать напряженное состояние в самых разнообразных металлоконструкциях, включая конструкции со сложным профилем, таких как рельсы [14–19]. Ранее выполнены работы, показавшие возможность оценки остаточных напряжений в рельсах электромагнитно-акустическим способом [20, 21], однако остается открытым вопрос о величине и соотношении продольных и поперечных напряжений в рельсах и значениях акустоупругих коэффициентов.

Цель работы: исследование акустоупругих и упругоакустических коэффициентов для сдвиговых и продольных волн при оценке остаточных напряжений в элементах и отрезках рельсов.

Методика измерений и оборудование

В основе метода оценки внутренних напряжений лежит явление акустоупругости, описывающее зависимость скорости распространения

ультразвуковых волн от механических напряжений в твердом теле, связанных через акустические коэффициенты. Согласно ГОСТ Р 52731 «Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений» значения напряжений рассчитывают по формулам акустопругости для одноосного и двухосного напряженного состояния. Для измерений скорости распространения ультразвуковых волн используют сдвиговые и продольные волны. Разница в скоростях пробега волн, поляризованных в направлении максимальных и минимальных действующих напряжений, на одном участке объекта дает возможность определить уровень действующих напряжений на этом участ-

стке. Для расчетов уровней напряжений важно, чтобы волны проходили одинаковый путь, что возможно при нормальном их вводе в объект с плоскопараллельными сторонами. Для возбуждения и приема сдвиговых волн в работе используется электромагнитно-акустический преобразователь (ЭМАП), а также пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), обеспечивающие ввод продольных волн нормально поверхности катания рельса, устанавливаемые на том же участке, что и ЭМАП. Возбуждение и прием волн обеспечивали с помощью структуроскопа СЭМА и дефектоскопа ДЮ 1000. Основные технические характеристики структуроскопа СЭМА приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики структуроскопа СЭМА

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерения временных интервалов, мкс	от 30 до 1000
Погрешность измерения времен прихода импульсов, нс	0,5
Материал контролируемых объектов	Ферромагнитные стали
Толщина контролируемого объекта, мм	От 20 до 500
Амплитуда генератора зондирующих импульсов, кВ	2,0 кВ
Рабочая частота, МГц	2,5 МГц
Полоса пропускания усилителя, МГц	0,6–6,6 МГц
Коэффициент усиления, дБ	66 дБ

Схема прозвучивания рельса сдвиговыми волнами представлена на рис. 1, а. ЭМА-преобразователь устанавливается на головку рельса, в котором возбуждаются ортогонально поляризованные сдвиговые волны, отражающиеся от подошвы рельса и принимающиеся

этим же ЭМАП. Принятые сигналы (рис. 1, б) обрабатываются в специализированном программном обеспечении ПРИНЦ [22, 23], в котором можно сравнивать импульсы двух принятых сигналов, измерять их амплитуду и разницу времен прихода.

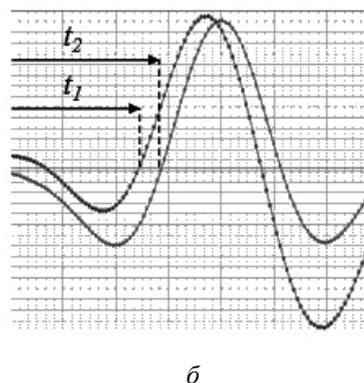
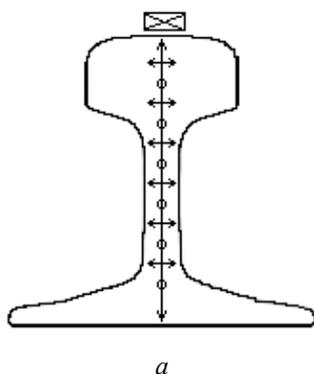


Рис. 1. Схема прозвучивания рельса сдвиговыми волнами продольной и поперечной поляризации (а), принятый сигнал (б)

Разница во времени прохождения импульсов, поляризованных вдоль и перпендикулярно оси рельса, пропорциональна значению остаточных продольных напряжений при условии, что продольные напряжения значительно превышают поперечные. Значения времени распростране-

ния сдвиговых волн t_1 и t_2 по одному участку рельса используются для вычисления остаточных продольных напряжений σ по формуле

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

где D – коэффициент упругоакустической связи для исследуемого рельса, определенный экспериментально и равный – 131 ГПа; t_1, t_2 – значения временных задержек сдвиговых волн, поляризованных соответственно вдоль и поперек рельса.

Определение продольных остаточных напряжений

Для исследований были выбраны образцы рельсов марки Р65, изготовленных по технологиям объемной закалки и дифференцированного

упрочнения. Измерения проведены с использованием ЭМАП, излучающем две сдвиговые ортогонально поляризованные волны с прямым углом ввода. Преобразователь устанавливался на поверхность катания головки и на боковую поверхность шейки рельса.

Измерения проводились на девяти отрезках рельсов, один из них объемно закаленный (№ 1), остальные дифференцированно упрочненные, изготовленные разными предприятиями (табл. 2).

Таблица 2. Параметры исследованных рельсов

№ п/п	Маркировка рельсов	Тип закалки/упрочнения	Длина отрезка рельса, мм	Остаточные напряжения, МПа
1	1	Объемная	250	-40
2	4 102К	Дифференцированная	250	65
3	5 403К	Дифференцированная	250	58
4	8 505К	Дифференцированная	250	53
5	Н1	Дифференцированная	100	34
6	Н3	Дифференцированная	100	26
7	Н6	Дифференцированная	100	-35
8	103 ИИ	Отжиг	250	80
9	103 IO	Дифференцированная	250	80

По результатам измерений построен график распределения продольных напряжений по длине отрезков рельсов. Результаты измерений напряжений при установке ЭМАП на поверхность катания рельса представлены на рис. 2, на боковую поверхность шейки – на рис. 3.

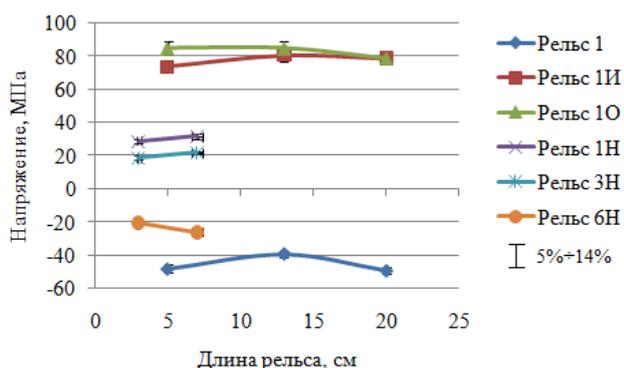


Рис. 2. Напряжения по длине отрезка рельса при установке ЭМАП на поверхность катания головки

Из графиков видно, что в объемно закаленном рельсе № 1 наблюдаются напряжения сжатия, полученные в результате суммирования остаточных напряжений сжатия в головке и подошве и растяжения в шейке (ср. рис. 2 и 3).

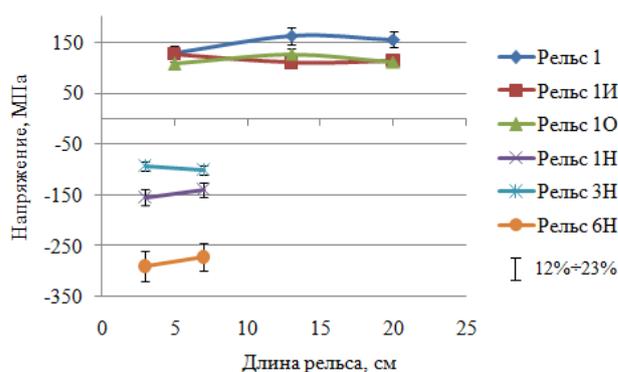


Рис. 3. Напряжения по длине отрезка рельса при установке ЭМАП на боковую поверхность шейки рельса

Определение двухосного напряженного состояния

Для определения коэффициентов акустоупругой и упругоакустической связи для головки и подошвы рельса образец с закрепленными на нем ЭМАП и ПЭП устанавливаются на опорную плиту машины для механических испытаний INSTRON 300DX, добиваются правильной его центровки и прикладывают к нему небольшую нагрузку для устранения зазоров между торцами образца с верхней и нижней опорных плит. На каждой ступени нагружения от 0 до 240 кН проводят измерения задержек импульсов упругих волн, распространяющихся в образце по нормали к боковой поверхности образца пер-

пендикулярно линии силовой нагрузки. Далее измеряют задержки сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек направления нагрузки, а также задержки продольной волны.

После обработки результатов рассчитывают коэффициенты акустоупругой связи напряжений и скорости сдвиговых и продольной волн. Далее по полученным коэффициентам акустоупругой связи рассчитываются коэффициенты упругоакустической связи, связывающие продольные и поперечные напряжения σ_1 и σ_2 с изменением задержки импульсов сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек направления проката рельса, с учетом задержки импульса продольной волны. Значения коэффициентов упругоакустической связи позволяют рассчитать напряжения для двухосного напряженного состояния по ГОСТ Р 52731.

Для исследования коэффициентов упругоакустической связи изготовлены образцы элементов рельса с вырезанной головкой и подошвой. Образцы последовательно сжимались на разрывной машине INSTRON. После измерения начальных значений временных задержек сдвиговых и поперечных волн образцы нагружались ступенчато с шагом 2 кН до 240 кН. Расчет коэффициентов упругоакустической связи производились по вторым донным отражениям.

Коэффициенты акустоупругой связи, устанавливающие степень воздействия напряжений σ на скорость сдвиговых волн:

$$k_1 = \frac{\Delta t_1}{t_{01}} \times \frac{1}{\sigma}, \quad (2)$$

$$k_2 = \frac{\Delta t_2}{t_{02}} \times \frac{1}{\sigma}, \quad (3)$$

$$k_3 = \frac{\Delta t_3}{t_{03}} \times \frac{1}{\sigma}, \quad (4)$$

где $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ – изменение задержки импульса упругой сдвиговой волны с вектором поляризации, параллельным напряжению σ , в нагруженном материале, мкс; t_{01}, t_{02}, t_{03} – изменение задержки импульса упругой сдвиговой волны с вектором поляризации, параллельным напряжению σ , в ненагруженном материале, мкс.

Коэффициент упругоакустической связи, связывающий напряжение σ с изменением задержки импульсов сдвиговых волн, поляризованных направлению проката материала и продольной волны:

$$K_1 = \frac{k_1 - k_2}{(k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2}, \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{k_2 - k_3}{(k_1 - k_3)^2 - (k_2 - k_3)^2}. \quad (6)$$

Рассчитанные значения коэффициентов упругоакустической связи позволяют оценить напряжения для двухосного напряженного состояния по формуле

$$\sigma_1 = K_1 \left(\frac{t_{01}t_3}{t_{03}t_1} - 1 \right) - K_2 \left(\frac{t_{02}t_3}{t_{03}t_2} - 1 \right), \quad (7)$$

$$\sigma_2 = K_1 \left(\frac{t_{02}t_3}{t_{03}t_2} - 1 \right) - K_2 \left(\frac{t_{01}t_3}{t_{03}t_1} - 1 \right). \quad (8)$$

Направление продольных σ_1 и поперечных σ_2 напряжений в головке и подошве представлены на рис. 4.

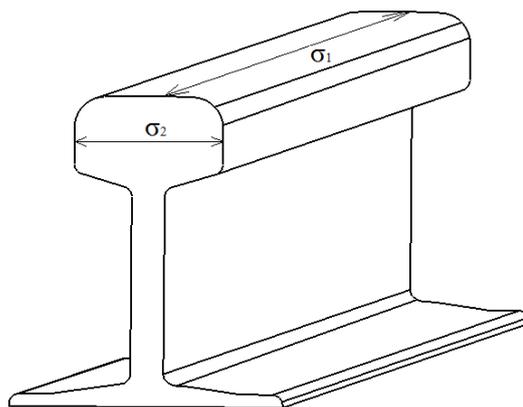


Рис. 4. Направление продольных σ_1 и поперечных σ_2 напряжений в головке рельса

Результаты расчета коэффициентов акустоупругой и упругоакустической связи, а также продольных σ_1 и поперечных σ_2 напряжений для головки и для подошвы представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета коэффициентов и напряжений для головки и подошвы

Обозначение	Головка	Подошва
$k_1, \text{Па}^{-1}$	$-3,977 \cdot 10^{-12}$	$1,385 \cdot 10^{-13}$
$k_2, \text{Па}^{-1}$	$1,147 \cdot 10^{-11}$	$1,462 \cdot 10^{-11}$
$k_3, \text{Па}^{-1}$	$-1,998 \cdot 10^{-11}$	$-5,501 \cdot 10^{-11}$
$K_1, \text{Па}$	$-2,183 \cdot 10^{10}$	$-3,053 \cdot 10^{10}$
$K_2, \text{Па}$	$-4,291 \cdot 10^{10}$	$-3,854 \cdot 10^{10}$
$\sigma_1, \text{МПа}$	-90,769	-74,317
$\sigma_2, \text{МПа}$	-0,087	-0,171

Выводы

Наиболее информативным методом акустической тензометрии для определения остаточных напряжений является метод, основанный на регистрации изменения скорости распространения упругих волн, зависящих от напряженного состояния, с использованием электромагнитно-акустического (ЭМА) и пьезоэлектрического (ПЭП) преобразователей для ввода и приема соответственно поперечных и продольной волн.

Получены экспериментально определенные значения продольных σ_1 и поперечных σ_2 напряжений для головки и для подошвы рельса и коэффициентов акустоупругой и упругоакустической связи, позволяющие оценить плоское напряженное состояние. При этом обнаружено, что продольные напряжения в рельсах выше на два порядка поперечных.

По результатам исследований констатируется, что остаточные напряжения в рельсах зависят от технологии изготовления. Значения остаточных напряжений оказались неодинаковыми как в каждом отрезке по его длине, так и существенно неодинаковыми в разных образцах, включая образцы, полученные по одной технологии.

Отмечено, что в объемно закаленном рельсе при прозвучивании от головки до подошвы наблюдаются напряжения сжатия, полученные в результате суммирования остаточных напряжений сжатия в головке и подошве и растяжения в шейке.

Библиографические ссылки

1. Самойлович Ю. А. Анализ термонапряженного состояния рельсов при объемной закалке // *Металлург*. 2011. № 11. С. 65–72.
2. Формирование полей внутренних напряжений в рельсах при длительной эксплуатации / О. А. Перегудов, К. В. Морозов, В. Е. Громов, А. М. Глезер, Ю. Ф. Иванов // *Деформация и разрушение материалов*. 2015. № 11. С. 34–37.
3. Покровский А. М., Воронов Ю. В., Третьяков Д. Н. Численное моделирование температурно-структурного и напряженного состояний в процессе закалки железнодорожного рельса // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2016. № 6 (675). С. 13–20.
4. Быстродействующая диагностическая акустико-эмиссионная система / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, В. Л. Кожемякин, А. Е. Ельцов, Е. Ю. Лебедев // *Дефектоскопия*. 1998. № 7. С. 8–14.
5. 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. : Машиностроение, 2011. 256 с.
6. Бехер С. А., Курбатов А. Н., Степанова Л. Н. Использование эффекта акустоупругости при исследовании механических напряжений в рельсах // *Вестник РГУПС*. 2013. № 2. С. 104–110.
7. 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.
8. Влияние температуры на задержку времени распространения ультразвуковых волн в рельсе / Л. Н. Степанова, А. Н. Курбатов, Е. С. Тенитилов и др. // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2014. № 5. С. 118–124.
9. Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической структуроскопии / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, В. В. Муравьев, С. В. Фольмер // *Дефектоскопия*. 2015. № 2. С. 44–51.
10. 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. С. 110–118.
11. Sukhorukov V. V., Slesarev D. A., Vorontsov A. N. Electromagnetic inspection and diagnostics of steel ropes: Technology, effectiveness and problems. In *Materials Evaluation*, 2014, vol. 72, pp. 1019-1027.
12. Antipov A. G., Markov A. A. 3D simulation and experiment on high speed rail MFL inspection. – *NDT&E International*, 2018, vol. 98, no. 9, pp. 177–185.
13. Pan S., Zhang D., Zhang E. Quantitative MFL testing technique for strand rope based on a small number of discontinuity samples. In *Materials Evaluation*, 2018, vol. 76, pp. 1108-1117.
14. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород : ТАЛАМ, 2005. 208 с.
15. Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений / М. Я. Марусина, А. В. Федоров, В. А. Быченко, И. В. Беркутов // *Измерительная техника*. 2014. № 10. С. 34–37.
16. Никитина Н. Е., Камышев А. В., Казачек С. В. Применение метода акустоупругости для определения напряжений в анизотропных трубных сталях // *Дефектоскопия*. 2015. № 3. С. 51–60.
17. Петров К. В., Соков М. Ю., Муравьева О. В. Влияние конструктивных особенностей проходного электромагнитно-акустического преобразователя на результаты контроля цилиндрических объектов // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2018. Т. 21. № 2. С. 135–146.
18. Стрижак В. А., Хасанов Р. Р., Пряхин А. В. Особенности возбуждения электромагнитно-акустического преобразователя при волноводном методе контроля // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2018. Т. 21. № 2. С. 159–166.

19. Муравьева О. В., Соков М. Ю. Влияние глубины залегания дефекта на параметры многократного электромагнитно-акустического метода контроля прутков // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2016. Т. 19. № 3. С. 46–50.

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

21. Танков К. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния дифференцированно термоупрочненных рельсов // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16. № 2. С. 78–83. DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-78-83.

22. 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.

23. Аппаратно-программный комплекс контроля прутков зеркально-теневым методом на многократных отражениях / В. А. Стрижак, А. В. Пряхин, Р. Р. Хасанов, А. Б. Ефремов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 6. С. 565–571.

References

1. Samoilovich Yu. A. *Metallurg* [Metallurgist]. 2011. no. 11, pp. 65-72 (in Russ.).

2. Peregudov O.A., Morozov K.V., Gromov V.E., Glezer A.M., Ivanov Yu. F. [Formation of internal stress fields in the rails during long-term operation]. *Deformacija i razrushenie materialov* [Deformation and destruction of materials]. 2015, no. 11, pp. 34-37 (in Russ.).

3. Pokrovskij A.M., Voronov Yu.V., Tretyakov D.N. [Numerical modeling of temperature-structural and stress states in the process of hardening of a railway rail]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering], 2016, no. 6, pp. 13-20 (in Russ.).

4. Sereznov A.N., Muravev V.V., Stepanova L.N., Kabanov S.I., Kozhemyakin V.L., Eltsov A.E., Lebedev E.Yu. [High-speed diagnostic acoustic emission system]. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], 1998, vol. 34, no. 7, pp. 481-485.

5. Kashubian N.I., Knyazkov V. L., Knyazkov A. F., Kozlov E. V., Koneva N. A. Makarov N. M. Murav'ev V. V., Popova N. A. Smirnov A. N., Folmer S. V. *Diagnostika, povrezhdaemost' i remont barabanov kotlov vysokogo davleniya* [Diagnosis, damage and repair of high-pressure boiler drums]. Moscow, Mechanical engineering, 2011 (in Russ.).

6. Becher S. A., Kurbatov A. N., Stepanova L. N. [Using the effect of acoustoelasticity in the study of

mechanical stresses in rails]. *Vestnik RGUPS* [RGUPS Bulletin], 2013, no. 2, pp. 104-110 (in Russ.).

7. Stepanova L. N., Becher, S. A., Kurbatov, A. N., Tenitilov E. S. [The study of the stress state of the rail using acoustoelasticity and tensometry]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Building], 2013, no. 7, pp. 103-109. (in Russ.).

8. Stepanova L. N., Kurbatov N., Tenitilov E. S. [The effect of temperature on the delay time of propagation of ultrasonic waves in the rail]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Building], 2014, no. 5, pp. 118-124. (in Russ.).

9. Smirnov A. N., Ababkov N. V., Murav'ev V. V., Folmer S. V. [Criteria for assessing the technical condition of a long-running metal of TPP equipment based on acoustic structuroscopy]. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], 2015, no. 2, pp. 44-51. DOI: 10.1134/S1061830915020084.

10. Becher S. A., Kolomeets A. O. [Development of methodology for determining the dynamic force by the strain gauge system]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Building], 2016, no. 3, pp. 110-118. (in Russ.).

11. Sukhorukov V.V., Slesarev D.A., Vorontsov A.N. Electromagnetic inspection and diagnostics of steel ropes: Technology, effectiveness and problems. [Materials Evaluation], 2014, vol. 72, pp. 1019-1027.

12. Antipov A.G., Markov A.A. 3D simulation and experiment on high speed rail MFL inspection. [NDT&E International], 2018, vol. 98, no.9, pp. 177–185. DOI: 10.1016/j.ndteint.2018.04.011.

13. Pan S., Zhang D., Zhang E. Quantitative MFL testing technique for strand rope based on a small number of discontinuity samples. [Materials Evaluation], 2018, vol. 76, pp. 1108-1117.

14. Nikitina N. E. *Akoustouprugost'. Opyt prakticheskogo primeneniya* [Acoustoelasticity. Practical experience]. 2005. N. Novgorod, TALAM. (in Russ.).

15. Marusina M.Ya., A.V. Fedorov, Bychenok V. A., Berkutov I. V. [Laser-ultrasound diagnostics of residual stresses]. *Izmeritel'naja tehnika* [Measurement techniques], 2014, no. 10, pp. 34-37 (in Russ.).

16. Nikitina N.E. Kamyshev A.V., Kazachek S.V. [The application of the acousto-elasticity method for stress determination in anisotropic pipe steels]. *Defektoskopija* [Russian Journal of Nondestructive Testing], 2015, vol. 51, no. 3, pp. 171-178.

17. Petrov K.V., Sokov M.Yu., Murav'eva O.V. [Influence of design features of the electromagnetic-acoustic transducer through passage on the results of the control of cylindrical objects]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU]. 2018, vol. 21, no. 2, pp. 135-146. (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-135-146.

18. Strizhak V.A., Hasanov R.R., Pryakhin A.V. [Features of excitation of electromagnetic-acoustic transducer at the waveguide control method]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of

Kalashnikov ISTU]. 2018, vol. 21, no. 2, pp. 159-166 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2018-2-159-166.

19. Murav'eva O.V., Sokov M.Y. [Influence of the Defect Depth on the Parameters of Electromagnetic-Acoustic Multiple-Shadow Method of the Rod Testing]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], 2016, vol. 19, no. 3, pp. 46-50 (in Russ.).

20. Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platonov A.V., Buldakova, I.V., Gushchina L.V. [Investigations of the Structural and Strain-Stress State of the Rails of Current Production by the Acoustic Elasticity Method]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU], 2018, vol. 21, no. 2, pp. 13-23 (in Russ.). (DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-13-23)

21. Tapkov K.A. [Strain stress modeling of differential hardening rails]. *Intellektual'nye sistemy v*

proizvodstve [Intelligent systems in production], 2018, vol. 16 no. 2, pp. 78-83. (in Russ.). DOI 10.22213/2410-9304-2018-2-78-83.

22. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Obukhov, S.A., Efremov A.B. [Information-measuring system for the excitation, reception, recording and processing of signals of electromagnetic-acoustic transducers]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], 2011, no. 1, pp. 243-250. (in Russ.).

23. Strizhak V.A., Pryakhin A.V., Hasanov R.R., Efremov A.B. [Hardware-software complex for control of bars by the mirror-shadow method on multiple reflections]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2017, vol. 60, no. 6, pp. 565-571 (in Russ.). DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-565-571.

Investigation of Biaxial Stress State in R65 Rails by Acoustoelasticity Method

V. V. Murav'ev, DSc in Engineering, Professor, Physical Technical Institute of UB RAS, Kalashnikov ISTU

A. V. Yakimov, Applicant, Kalashnikov ISTU

L. V. Volkova, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

A. V. Platonov, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU

The elastic-acoustic coupling coefficients and the biaxial stress form in R65 rail segments were investigated in this work by measuring the velocity of transverse and longitudinal waves. Measurements were made on nine rails by using structuroscopy SAM and DIO 1000 flaw detector; one of the rails was made according to the technology of bulk hardening, the other one was differentially hardened. Measurements were conducted by using electromagnetic-acoustic (EMA) and piezoelectric (PEP) converters for input and reception of transverse and longitudinal waves. The converters were mounted on the pommel tread and on the side surface of the rail neck. EMA-converter stimulates two transversal waves polarized in the longitudinal and transverse direction of the rail. Waves reflected from the opposite side of the sample are received by the same transducer. The longitudinal wave is stimulated by the PEP the same way. The received residual stress imports in some sections of rail segments became unequal both in each segment along its length and in various samples including samples made by the same technology. The pommel and the sole was cut from the rail to research the elastic-acoustic coupling coefficients k_1 , k_2 , k_3 by compressing in the longitudinal direction on the machine "INSTRON" with the load up to 240 kN. The initial values of time delays of acoustic waves were measured before testing the compression. The calculation of elastic-acoustic coupling coefficients was produced by the second data reflect. The elastic-acoustic coupling coefficients k_1 , k_2 were calculated under loading on the ends of the elements from 0 to 240 kN. It was detected that longitudinal stresses in rails are two digits higher than transverse waves. Thus, the most informative method of acoustic strain measurement for determining residual stresses is the technique, based on registering changes of the elastic waves extension speed, dependent on the stress condition by using electromagnetic-acoustic (EMA) and piezoelectric (PEP) converters for input and reception of transverse and longitudinal waves.

Keywords: acoustoelasticity coefficients, electromagnetic acoustic transducer, residual stresses, rail.

Получено: 06.02.19