

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОЛОВНЫХ ВОЛН ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЛЬСАХ

© 2024 г. К. В. Курашкин^{а, *}, А. Г. Кириллов^б, А. В. Гончар^а

^аИнститут проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения “Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук”, ул. Белинского 85, Нижний Новгород, 603024 Россия

^бИнститут прикладной физики РАН, ул. Ульянова 46, Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: kurashkin@ipmran.ru, ndi@ipmran.ru, kurashkinkv@yandex.ru

Поступила в редакцию 07.04.2023 г.

После доработки 31.05.2023 г.

Принято к публикации 22.06.2023 г.

Исследована возможность акустической тензометрии продольных остаточных и температурных напряжений в рельсах с помощью головных волн. Проведен теоретический анализ влияния напряжения и температуры на скорость распространения упругих волн в рельсовой стали. Приведен алгоритм определения продольного напряжения в рельсе на основе измерений времени распространения головных волн. Описан принцип работы и представлены основные параметры экспериментального образца акустического тензометра, в котором реализована дифференциальная схема измерения времени распространения головных волн. Излучение и прием головных волн, распространяющихся вдоль рельса, осуществляется с поверхности катания головки рельса с помощью контактных пьезоэлектрических преобразователей, расположенных на призмах из полиметилметакрилата. Представлены результаты акустомеханических испытаний и температурных тестов. Выполнен расчет погрешностей измерений. Приведены результаты оценки уровня остаточных сварочных напряжений в головке нового рельса. Экспериментальные результаты сравниваются с теоретическими оценками напряжений, которые возникают в рельсе под воздействием температуры, а также с имеющимися в литературе данными по остаточным напряжениям в рельсах.

Ключевые слова: акустическая тензометрия, головные волны, акустоупругий эффект, остаточные и температурные напряжения в рельсе

DOI: 10.31857/S0320791924010071 EDN: ZOEQQZ

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы во всем мире большое внимание уделяется поиску надежных способов ультразвукового контроля температурных и остаточных напряжений в рельсах. На современных бесстыковых железнодорожных путях существует риск возникновения аварийной ситуации по причине высокого уровня продольных механических напряжений в непрерывно-сваренных рельсовых плетях. Растягивающие напряжения могут привести к развитию трещин и излому рельсов. Сжимающие напряжения могут привести к потере устойчивости и выбросу рельсов. В обоих случаях возникает угроза безопасности движения поездов. Остаточные напряжения в рельсах возникают после прокатки, термической обработки, правки и сварки [1, 2]. Эти напряжения изменяются и перераспределяются в процессе эксплуатации железнодорожного пути в результате многократного воздействия подвижного состава

[3, 4]. Температурные напряжения в рельсовых плетях возникают при изменении температуры по сравнению с температурой закрепления (нейтральной температурой) [5, 6].

Акустическая тензометрия – метод ультразвукового контроля напряжений – обладает большим потенциалом применительно к определению температурных и остаточных напряжений в рельсах [1, 4–13]. Для решения задач по определению напряжений в рельсах наиболее распространены измерители на основе бесконтактных электромагнитно-акустических [1, 8–10, 12] и контактных пьезоэлектрических преобразователей [4–7, 13]. Известны также попытки использовать для контроля напряжений в рельсах лазерно-ультразвуковой преобразователь [11]. Основная научно-техническая проблема при акустической тензометрии заключается в том, что напряжения, температура и структурное состояние материала производят сопоставимый эффект на параметры распространения упругих

Таблица 1. Константы упругости рельсовой стали

Источник	λ , ГПа	μ , ГПа	l , ГПа	m , ГПа	n , ГПа
[18]	116 ± 3	80 ± 2	-248 ± 7	-623 ± 26	-714 ± 19
[18]	111 ± 3	82 ± 2	-302 ± 8	-616 ± 25	-724 ± 20
[19]	112 ± 1	81 ± 1	-358 ± 18	-650 ± 20	-721 ± 22
Среднее	113	81	-303	-630	-720

волн [14]. Кроме того, при проведении измерений возникает ряд трудностей, обусловленных особенностями излучения и приема упругих волн, а также обработки сигналов [14]. Для практической реализации способов ультразвукового контроля напряжений в рельсах требуется применение инновационных научных и технических решений, а новые работы в этой области представляют практический коммерческий интерес.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности акустической тензометрии рельсов с помощью головных волн.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Принцип акустической тензометрии основан на акустоупругом эффекте, который отражает влияние напряжений (упругих деформаций) на скорости распространения упругих волн. Для изотропного твердого тела связи между напряжениями и скоростями распространения продольных и поперечных волн определены аналитически на основе соотношений нелинейной теории упругости [15]. Если напряжение приложено параллельно направлению распространения волны, то

$$\rho_0 V_l^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \times \left(2l + \lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4m + 4\lambda + 10\mu) \right), \quad (1)$$

$$\rho_0 V_s^2 = \mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left(m + \frac{\lambda n}{4\mu} + 4\lambda + 4\mu \right). \quad (2)$$

Если напряжение приложено перпендикулярно направлению распространения волны, то

$$\rho_0 V_l^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left(2l - \frac{2\lambda}{\mu} (m + \lambda + 2\mu) \right), \quad (3)$$

$$\rho_0 V_{s1}^2 = \mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left(m + \frac{\lambda n}{4\mu} + \lambda + 2\mu \right), \quad (4)$$

$$\rho_0 V_{s2}^2 = \mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \left(m - \frac{(\lambda + \mu)}{2\mu} n - 2\lambda \right). \quad (5)$$

Здесь σ – одноосное напряжение; V_l – скорость распространения продольной волны, V_s – скорость распространения поперечной волны, индексы 1 и 2 обозначают направление поляризации поперечной волны: 1 – вдоль направления приложенного напряжения, 2 – поперек направления приложенного напряжения; λ и μ – постоянные Ламе, константы упругости второго порядка; l , m , n – постоянные Мурнагана, константы упругости третьего порядка; ρ_0 – плотность материала в отсутствие напряжений.

Относительное изменение скорости в первом приближении линейно зависит от напряжения, что в общем виде выражается как [5, 6, 14, 16, 17]

$$\frac{V_\sigma - V_0}{V_0} = k_\sigma \sigma, \quad (6)$$

где V_σ – скорость распространения упругой волны в материале с напряжением, V_0 – скорость распространения упругой волны в материале без напряжения, k_σ – соответствующий коэффициент акустоупругости, который выражается через константы упругости второго и третьего порядка.

В табл. 1 представлены значения констант упругости второго и третьего порядка для рельсовой стали, найденные в научной литературе. В табл. 2 приведены сводные результаты вычислений коэффициентов акустоупругости для продольных и поперечных волн при $\lambda = 113$ ГПа, $\mu = 81$ ГПа, $l = -303$ ГПа, $m = -630$ ГПа и $n = -720$ ГПа, из которых следует, что наиболее чувствительна к напряжению продольная волна, распространяющаяся параллельно приложенному напряжению.

Для определения продольных напряжений в рельсах представляется перспективным использовать критически преломленные продольные (головные) волны, распространяющиеся вдоль рельса [4, 7]. Излучение и прием таких волн может осуществляться с поверхности катания головки рельса с помощью контактных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), расположенных на призмах из полиметилметакрилата [4, 7]. Однако для достоверного определения напряжений в рельсах необходимо учитывать влияние температуры.

Таблица 2. Коэффициенты акустоупругости рельсовой стали

k_{σ} , ТПа ⁻¹	Условия
-12.7	Продольная волна; напряжение приложено параллельно направлению распространения волны
1.4	Продольная волна; напряжение приложено перпендикулярно направлению распространения волны
-1.3	Поперечная волна; напряжение приложено параллельно направлению распространения волны
-7.4	Поперечная волна; напряжение приложено перпендикулярно направлению распространения и параллельно оси поляризации волны
0.1	Поперечная волна; напряжение приложено перпендикулярно направлению распространения и оси поляризации волны

Относительное изменение скорости распространения упругих волн в зависимости от температуры можно выразить как [19, 20]

$$\frac{V_T - V_{T_0}}{V_{T_0}} = k_T (T - T_0), \quad (7)$$

где V_T – скорость упругих волн при температуре T , V_{T_0} – скорость упругих волн при температуре T_0 , k_T – соответствующий температурный коэффициент, отрицательный для твердых тел.

В [21] приводятся данные, позволяющие провести оценку температурных коэффициентов для продольных волн в рельсовой стали и в полиметилметакрилате: для полиметилметакрилата $k_T = -0.00086 \text{ K}^{-1}$, для рельсовой стали $k_T = -0.00009 \text{ K}^{-1}$. Таким образом, в полиметилметакрилате относительное изменение скорости при изменении температуры на порядок больше, чем в рельсовой стали, поэтому при выборе схемы измерений критически важно компенсировать влияние теплового расширения призм из полиметилметакрилата.

На практике, как правило, измеряется время распространения, а не скорость. Относительное изменение времени распространения упругой волны в зависимости от температуры и напряжения определяется следующим уравнением [20]:

$$\frac{t_{\sigma, T} - t_{0, T_0}}{t_{0, T_0}} = k_{\sigma}^* \sigma + k_T^* (T - T_0), \quad (8)$$

где t_0 , T_0 – время распространения волны в материале без напряжения при температуре T_0 , t_{σ} , T – время распространения волны в материале с напряжением при температуре T , k_{σ}^* – соответствующий коэффициент акустоупругости, k_T^* – соответствующий температурный коэффициент.

Напряжение можно определить, если измерить времена распространения t_{σ} , T и t_0 , T_0 , а также температуры T и T_0 :

$$\sigma = \frac{1}{k_{\sigma}^*} \left(\frac{t_{\sigma, T} - t_{0, T_0}}{t_{0, T_0}} - k_T^* (T - T_0) \right). \quad (9)$$

Если измерения проходят при постоянной температуре, то напряжение можно определить, измеряя только времена распространения на фиксированной базе.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. Принцип и схема измерений

Время распространения головных волн в рельсах измерялось с помощью экспериментального образца акустического тензометра [22]. Излучение и прием головных волн осуществлялось с поверхности катания головки рельса с помощью контактных ПЭП номинальной частотой 1.25 МГц, расположенных на призмах из полиметилметакрилата под углом 27°. Дифференциальная схема измерений (рис. 1) позволила компенсировать влияние теплового расширения призм из полиметилметакрилата и значительно уменьшить влияние слоя контактной жидкости и линий задержки [23, 24]. Измеряемое время t (рис. 2) фактически соответствовало времени распространения головной волны в рельсе на расстояние L между первым и вторым приемными ПЭП, которое составляло около 240 мм.

3.2. Предварительные измерения

В лабораторных условиях на нескольких фрагментах длиной 500 мм, вырезанных из разных рельсов, выполнялись измерения времени распространения головных волн. Температура в помещении составляла +21°C. В качестве контактной жидкости использовался УЗИ-гель. Измерения повторялись по 10 раз на каждом фрагменте. Задача тестов состояла в том, чтобы оценить влияние вариаций позиционирования измерительного блока на рельсе и условий контакта измерительного

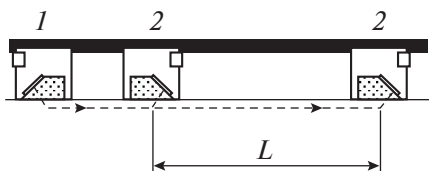


Рис. 1. Дифференциальная схема измерений времени распространения головных волн: 1 – излучающий ПЭП, 2 – приемные ПЭП.

блока с поверхностью рельса на погрешность измерений времени распространения головных волн между приемными ПЭП.

Для каждого фрагмента время распространения головных волн составляло около 40 мкс, при этом случайная погрешность измерений не превышала 8 нс, а относительная погрешность – 0.02%. Однако времена распространения головных волн в нескольких исследованных фрагментах рельсов значительно отличаются (~100 нс), что объясняется различием их структурного состояния, структурной неоднородностью: накопленная структурная поврежденность, текстура, остаточные внутренние напряжения влияют на эффективные упругие свойства [9, 14, 25, 26]. В среднем скорость головных волн в рельсах составила около 5900 м/с. Согласно имеющимся справочным данным [27], глубина проникновения головной волны в материал приблизительно равна 4λ , где λ – длина волны. Следовательно, глубина проникновения головной волны частотой 1.25 МГц в рельсовую сталь – около 19 мм.

3.3. Акустомеханические испытания

Проверка работоспособности экспериментального образца акустического тензометра выполнялась в ходе акустомеханических испытаний двух фрагментов рельсов длиной 500 мм при сжатии с помощью машины для статических испытаний ГМС-100. Фрагмент рельса с закрепленным на нем измерительным блоком устанавливался между упорными площадками машины для испытаний. Далее выставлялась сжимающая нагрузка F и проводилось измерение времени распространения головной волны t . Тесты повторялись при нагружении с шагом 5 т до максимальной нагрузки 90 т. В качестве контактной жидкости использовался УЗИ-гель. Температура в помещении составляла $+25^\circ\text{C}$. Как и ожидалось, время распространения головных волн t линейно уменьшалось с увеличением приложенной сжимающей нагрузки F (рис. 3). При фиксированном положении экспериментального образца на фрагменте рельса во время акустомеханических испытаний относительная погрешность измерения времени распространения головных волн не превышала 0.0035%.

Теоретически ожидаемые значения напряжения при равномерном распределении нагрузки по сечению рельса вычислялись как F/S , где $S = 82.65 \text{ см}^2$ – площадь поперечного сечения рельса. Однако торцы фрагментов не были идеально плоскопараллельны, и условия сжатия оказались такими, что основное пятно контакта приходилось на подошву рельса. Соответственно, нагрузка неравномерно распределялась по сечению рельса.

Фактические напряжения в головке рельса вычислялись на основе данных акустических измерений по формуле (9) при постоянной температуре. На основании имеющихся в литературе данных [4, 7, 13, 20, 21] при расчете использовался коэффициент акустоупругости $k_\sigma^* = 12.7 \text{ ТПа}^{-1}$ для головных волн, распространяющихся вдоль рельса, который определяет чувствительность к продольному напряжению. Погрешность определения напряжения Δ_σ оценивалась по следующей формуле:

$$\Delta_\sigma \approx \frac{\delta_t \sqrt{2}}{k_\sigma}, \quad (10)$$

где δ_t – относительная погрешность измерения времени распространения головных волн. Максимальная погрешность определения напряжения, вычисленная по формуле (10), при акустомеханических испытаниях составила 4 МПа. Полученные в результате акустических измерений напряжения являются средними напряжениями в слое толщиной 19 мм на базе 240 мм.

Сравнительный анализ показал, что фактические напряжения в головке рельса оказались меньше ожидаемых при равномерном распределении нагрузки по сечению рельса (рис. 4).

3.4. Температурные тесты

Для оценки температурных эффектов фрагмент рельса длиной 500 мм и установленный на нем измерительный блок помещались в камеру из теплоизоляционного материала и нагревались с помощью фена с цифровым управлением температурой. Температура рельса контролировалась с помощью двух термопар К типа и цифрового термометра AZ8852. Ввиду габаритов и большой массы фрагмента рельса температурное равновесие внутри камеры устанавливалось около 20 мин. В качестве контактной жидкости использовалось силиконовое масло ПМС-1000. Эксперименты повторялись несколько раз на разных фрагментах рельсов при нагреве и остывании. На рис. 5 для четырех серий испытаний окрашенными символами показаны результаты, полученные при нагреве, пустыми символами – при остывании. Полученные экспериментальные данные позволили определить температурный коэффициент $k_T^* = (101 \pm 3) \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Таким образом, изменение температуры на 1°C

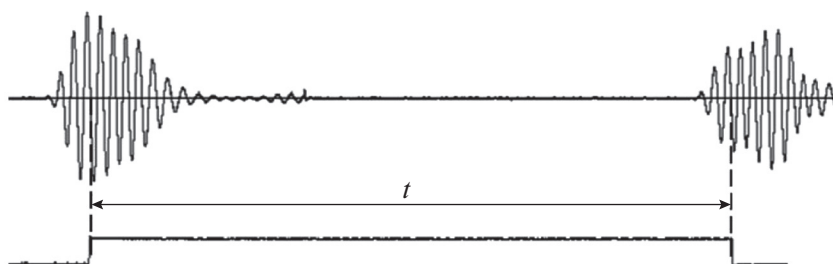


Рис. 2. Сигналы на первом и втором приемных ПЭП, импульс, формируемый измерителем по установленным стробам, и измеряемое время распространения головных волн t .

вызывает относительное изменение времени распространения головной волны на 0.01%, что аналогично изменению, которое вызывает продольное напряжение 8 МПа.

3.5. Натурные испытания

Натурные испытания выполнялись на рельсосварочном предприятии. Исследовались остаточные сварочные напряжения в головке нового рельса Р65 ДТ350. По информации, полученной от изготовителя, сварной шов выполнялся контактно-стыковой сваркой; поверхность сварного шва в зоне головки рельса подвергалась последующей термообработке индукционным методом. Цель эксперимента заключалась в оценке уровня остаточных продольных напряжений, которые возникли в головке рельса в результате сварки и последующей термообработки сварного шва.

Времена распространения головных волн измерялись в четырех зонах на разном расстоянии от сварного стыка с помощью экспериментального образца акустического тензомера. Измерения повторялись 10 раз в каждой зоне. Относительная погрешность измерения времени распространения головных волн не превышала 0.02%. Протяженность одной зоны соответствовала расстоянию между приемными ПЭП и равнялась 240 мм. Середина каждой зоны находилась на расстоянии 150, 500, 800 и 1100 мм от центра сварного шва соответственно. В качестве контактной жидкости использовался УЗИ-гель. Температура рельса и окружающей среды составляла +20°C.

Остаточные напряжения определялись по формуле (9) при постоянной температуре. При расчете использовался коэффициент акустоупругости $k_{\sigma}^* = 12.7 \text{ ТПа}^{-1}$. Из соображений, что остаточные сварочные напряжения достаточно быстро спадают по мере удаления от шва и на расстоянии более 1 м заведомо равны нулю, в качестве начального параметра t_0 использовалось значение времени распространения головных волн в крайней зоне, наиболее удаленной от сварного шва. В результате

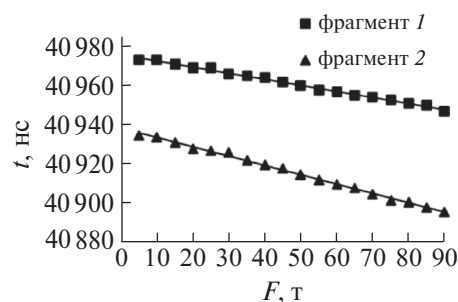


Рис. 3. Зависимости времен распространения головных волн от сжимающей нагрузки для двух испытанных фрагментов рельсов.

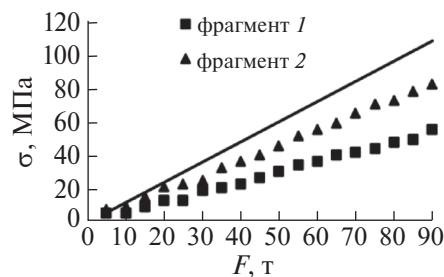


Рис. 4. Продольные сжимающие напряжения в головке рельса: точки — экспериментальные значения, определенные с помощью ультразвуковых измерений; сплошная линия — теоретические значения, ожидаемые при равномерном распределении нагрузки по сечению рельса.

было получено распределение остаточных сварочных напряжений, действующих вдоль рельса (рис. 6). Вычисленные в результате акустических измерений значения являются средними остаточными сварочными напряжениями в слое толщиной 19 мм на базе 240 мм. Погрешность определения напряжений оценивалась по формуле (10) и составила 22 МПа.

Как следует из полученных результатов (рис. 6), вблизи сварного стыка в головке рельса действуют

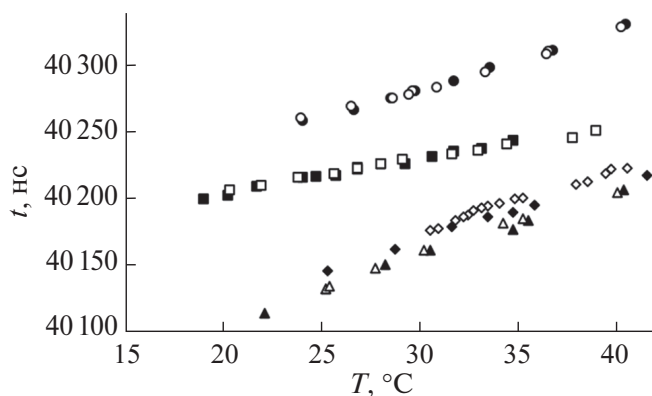


Рис. 5. Температурные зависимости времен распространения головных волн в рельсах.

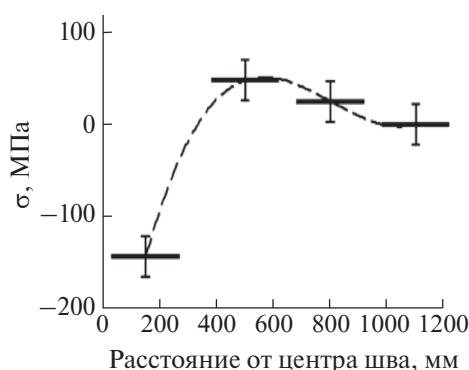


Рис. 6. Распределение остаточных сварочных напряжений в новом рельсе.

сжимающие остаточные напряжения, что совпадает с данными из литературных источников. Так, в [2] была разработана термомеханическая конечно-элементная модель процесса термитной сварки, численным методом определены остаточные напряжения в зоне влияния сварного шва и, в частности, установлено, что в поперечном сечении на поверхности головки возникают сжимающие напряжения, достигающие -340 МПа.

Полученные численные значения напряжения (-144 МПа) необходимо сравнить с данными по остаточным напряжениям, возникающим в процессе эксплуатации из-за воздействий подвижного состава. В [7] указано, что в некоторых случаях остаточные сжимающие продольные напряжения в головке рельса достигают -300 МПа. В [4] акустическим методом, основанным на использовании головных волн частотой 2.25 МГц, были определены остаточные напряжения в рельсах ~ -500 МПа. В [9, 12] электромагнитно-акустическим методом определялись средние значения остаточных напряжений по сечению рельса, диапазон значений для разных рельсов составил от -20 до -95 МПа.

Полезно также сравнить полученные результаты с температурными напряжениями, возникающими в рельсе при эксплуатации. При изменении температуры по сравнению с температурой закрепления (нейтральной температурой) в сечении рельса возникает продольное напряжение [5, 6]

$$\sigma = \alpha E (T_N - T), \quad (11)$$

где σ – продольное напряжение, $E = 210$ ГПа – модуль Юнга рельсовой стали, $\alpha = 11.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ – коэффициент линейного теплового расширения рельсовой стали, T_N – температура закрепления рельса, T – температура, при которой определяется напряжение. Из уравнения (11) следует, что при увеличении температуры на 10°C по сравнению с температурой закрепления в рельсе возникает сжимающее напряжение -25 МПа.

Таким образом, остаточные сварочные напряжения сравнимы с температурными и остаточными напряжениями, которые возникают в рельсе в процессе эксплуатации, что важно учитывать при разработке способов оценки напряжений в рельсах.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан экспериментальный образец акустического тензомера, в котором с помощью наклонных контактных пьезоэлектрических преобразователей осуществляется излучение и прием головных волн и реализуется дифференциальная схема измерения времени их распространения.

Проведены лабораторные испытания и установлено, что разработанный прибор позволяет устойчиво измерять время распространения головной волны в головке рельса при изменении упругой нагрузки и/или температуры, а значит, может применяться для контроля напряжений в рельсах. Относительная погрешность измерения времени при вариациях позиционирования измерительного блока на рельсе и условий контакта измерительного блока с поверхностью рельса не превышала 0.02% , а при фиксированном положении во время акустомеханических или температурных испытаний не превышала 0.0035% .

Выполнены натурные испытания по определению остаточных сварочных напряжений в головке нового рельса. Погрешность определения напряжения составила около 22 МПа. Таким образом, предлагаемый способ акустической тензометрии может использоваться на рельсосварочных предприятиях для контроля качества термообработки при снятии остаточных сварочных напряжений.

Разработанный акустический тензомер может найти применение для периодического мониторинга потенциально опасных участков железнодорожных путей, что позволит избежать

аварийных ситуаций, связанных с температурным выбросом рельсовых плетей, и повысить уровень безопасности движения железнодорожного транспорта.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН на проведение фундаментальных научных исследований на 2021–2023 гг. по теме № 0030-2021-0025, регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР 121071600007-3. Экспериментальный образец акустического тензометра создан в рамках договора № 45-358/707-903/2021 между ИПФ РАН и АО “НПП “ПОЛЕТ” от 23.06.2021, регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКТР 122081000081-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Murav'ev V.V., Tapkov K.A., Len'kov S.V.* On the question of monitoring residual stresses in selectively heat-strengthened rails // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2018. V. 54. № 10. P. 675–681. <https://doi.org/10.1134/S106183091810008X>
2. *Коссов В.С., Протопопов А.Л., Волохов Г.М., Краснов О.Г., Огуенко В.Н.* Расчетная оценка остаточных напряжений в алюминотермитных стыках рельсов // *Путь и путевое хозяйство.* 2022. № 9. С. 23–28.
3. *Peregudov O.A., Morozov K.V., Gromov V.E., Glezer A.M., Ivanov Yu.F.* Formation of internal stress fields in rails during long-term operation // *Russ. Metall.* 2016. V. 2016. № 4. P. 371–374. <https://doi.org/10.1134/S0036029516040182>
4. *Hwang Y., Kim G., Kim Y., Park J., Choi M.Y., Kim K.* Experimental measurement of residual stress distribution in rail specimens using ultrasonic Lcr waves // *Appl. Sci.* 2021. V. 11. № 19. a.n. 9306. <https://doi.org/10.3390/app11199306>
5. *Xiangyu D., Liqiang Z., Zujun Y., Xining X.* The verification of rail thermal stress measurement system // *Period. Polytech. Transport. Eng.* 2020. V. 48. № 1. P. 45–51. <https://doi.org/10.3311/PPTR.12062>
6. *Vangi D., Virga A.* A practical application of ultrasonic thermal stress monitoring in continuous welded rails // *Exp. Mech.* 2007. V. 47. № 5. P. 617–623. <https://doi.org/10.1007/s11340-006-9016-6>
7. *Szelągżek J.* Ultrasonic measurement of thermal stresses in continuously welded rails // *NDT&E Int.* 1992. V. 25. № 2. P. 77–85. [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(92\)90497-5](https://doi.org/10.1016/0963-8695(92)90497-5)
8. *Hirao M., Ogi H., Fukuoka H.* Advanced ultrasonic method for measuring rail axial stresses with electromagnetic acoustic transducer // *Res. Nondestruct. Eval.* 1994. V. 5. № 3. P. 211–223. <https://doi.org/10.1080/09349849409409669>
9. *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 // *Russ. Metall.* 2016. V. 2016. № 10. P. 992–995. <https://doi.org/10.1134/S003602951610013X>
10. *Murav'ev V.V., Volkova L.V., Platonov A.V., Kulikov V.A.* An electromagnetic-acoustic method for studying stress-strain states of rails // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2016. V. 52. № 7. P. 370–376. <https://doi.org/10.1134/S1061830916070044>
11. *Karabutov A.A., Podymova N.B., Cherepetskaya E.B.* Determination of uniaxial stresses in steel structures by the laser-ultrasonic method // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2017. V. 58. № 3. P. 503–510. <https://doi.org/10.1134/S0021894417030154>
12. *Muravev V.V., Tapkov K.A., Lenkov S.V.* In-production nondestructive testing of internal stresses in rails using acoustoelasticity method // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2019. V. 55. № 1. P. 8–14. <https://doi.org/10.1134/S1061830919010078>
13. *Sun L., Li Z., Zhu W.F., He Y., Fan G., Fang W., Shao W.* A method for long-term on-line monitoring of temperature stress of continuously welded rail // *Adv. Mech. Eng.* 2021. V. 13. № 8. P. 1–14. <https://doi.org/10.1177/16878140211041432>
14. *Никитина Н.Е.* Акустоупругость. Опыт практического применения. Нижний Новгород: ТАЛАН, 2005. 208 с.
15. *Hughes D.S., Kelly J.L.* Second-Order Elastic Deformation of Solids // *Phys. Rev.* 1953. V. 92. № 5. P. 1145–1149. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1145>
16. *Ивочкин А.Ю., Карабутов А.А., Лямшев М.Л., Пеливанов И.М., Рохатги У., Субудхи М.* Измерение распределения скорости продольных акустических волн в сварных соединениях лазерным оптико-акустическим методом // *Акуст. журн.* 2007. Т. 53. № 4. С. 540–547.
17. *Жаринов А.Н., Карабутов А.А., Миронова Е.А., Пичков С.Н., Саватеева Е.В., Симонова В.А., Шишулин Д.Н., Черепецкая Е.Б.* Лазерно-ультразвуковое исследование остаточных напряжений в трубах из аустенитной стали // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 3. С. 372–381.
18. *Egle D.M., Bray D.E.* Measurement of acoustoelastic and third-order elastic constants for rail steel // *J. Acoust. Soc. Am.* 1976. V. 60. № 3. P. 741–744. <https://doi.org/10.1121/1.381146>
19. *Schneider E.* 4. Ultrasonic techniques // In: *Hauk V.* (Ed.) *Structural and residual stress analysis by nondestructive methods.* Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1997. 640 p. P. 522–563. <https://doi.org/10.1016/B978-044482476-9/50018-9>
20. *Анисимов В.А., Каторгин Б.И., Куценко А.Н.* и др. Акустическая тензометрия // В: Ключев В.В. (ред) *Неразрушающий контроль: Справочник.* М.: Машиностроение, 2006. Т. 4. 736 с.
21. *Bray D.E., Stanley R.K.* Nondestructive evaluation: a tool in design, manufacturing and service. Boca Ra-

- ton: CRC Press, 1997. 586 p.
<https://doi.org/10.1201/9781315272993>
22. *Курашкин К.В., Кириллов А.Г., Беляев Р.В.* Опытный образец акустического тензометра для определения температурных напряжений в рельсах // Приборы и техника эксперимента. 2023. № 4. С. 156–158.
23. *Szeląg J.* Sets of piezoelectric probeheads for stress evaluation with subsurface waves // J. Nondestruct. Eval. 2013. V. 32. № 2. P. 188–199.
<https://doi.org/10.1007/s10921-013-0172-1>
24. *Liu H., Li Y., Li T. et al.* Influence factors analysis and accuracy improvement for stress measurement using ultrasonic longitudinal critically re-fracted (LCR) wave // Appl. Acoust. 2018. V. 141. P. 178–187.
<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.07.017>
25. *Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Нин Ван.* Экспериментальные исследования упругой нелинейности в структурно-неоднородных материалах // Акуст. журн. 2005. Т. 51. № 5. С. 663–671.
26. *Курашкин К.В.* Исследование акустоупругого эффекта в анизотропном пластически деформированном материале // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 3. С. 382–388.
27. *Алешин Н.П., Белый В.Е., Вopilкин А.Х. и др.* Методы акустического контроля металлов. М.: Машиностроение, 1989. 456 с.