

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ

УДК 620.179.16

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-64-74

Определение влияния температуры на продольные напряжения в рельсах с использованием эффекта акустоупругости

Л. Н. Степанова, доктор технических наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

А. Н. Курбатов, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

С. И. Кабанов, кандидат технических наук, Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина, Новосибирск, Россия

С. А. Бехер, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

В. В. Чернова, кандидат технических наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

Контроль железнодорожного рельсового пути относится к одной из основных работ, необходимых для обеспечения безопасности пассажирских и грузовых перевозок, как в нашей стране, так и за рубежом. В современных условиях обеспечение безаварийной работы железной дороги связано с решением задач по определению продольных напряжений в рельсах, вызванных большой протяженностью бесстыкового пути, повышением скорости перевозок, увеличением грузооборота и влиянием температуры окружающей среды. На продольные напряжения в рельсах большое влияние оказывает температура. Из-за отсутствия температурной компенсации в закрепленном бесстыковом пути рельсовые пластины не могут свободно расширяться и сжиматься при ее изменении. Превышение допустимых продольных напряжений в рельсах может вызывать появление и развитие усталостных трещин, разрушение рельсового пути и аварийные ситуации, что может привести к их температурному выбросу, потере устойчивости и изгибу. Поэтому разрабатываются современные методы неразрушающего контроля и диагностические микропроцессорные системы, совершенствуется программное обеспечение к ним. Среди известных методов неразрушающего контроля наибольшее распространение получили акустические методы (ультразвуковой и эффект акустоупругости). Принцип действия эффекта акустоупругости основан на зависимости продольных напряжений от скорости упругих ультразвуковых волн. В настоящей работе осуществлялось определение влияния температуры на продольные напряжения в рельсах. При использовании эффекта акустоупругости регистрировались продольные, поперечные и трансформированные волны при нормальных условиях, а также при положительных и отрицательных температурах окружающей среды. При этом основным измеряемым параметром является время распространения ультразвукового сигнала от излучателя до приемника через участок рельса. Исследования показали, что скорости упругих волн уменьшаются при нагревании материала рельса и определяются в основном температурными зависимостями модулей упругости. Информация, получаемая при контроле рельсов, записывалась в микропроцессорную систему «Акуст-1»,ирующую на основе эффекта акустоупругости. Для подтверждения результатов, получаемых этой системой, использовалась тензометрия. Контроль продольных напряжений осуществлялся сертифицированной многоканальной микропроцессорной тензометрической системой ММТС-64.01 класса точности 0,2. Предложена схема контроля продольных механических напряжений в рельсах с использованием продольных, поперечных и трансформированных волн. Для контроля высоты рельса дополнительно между излучающим и приемным наклонными преобразователями устанавливался раздельно-совмещенный прямой преобразователь. Разработанный акустический способ контроля на основе эффекта акустоупругости позволяет определять механические напряжения в рельсах с погрешностью, не превышающей 10 %, что допустимо для его практического применения на железной дороге.

Ключевые слова: бесстыковой путь, продольное напряжение, рельс, акустоупругость, тензометрия, неразрушающий контроль, ультразвук.

Введение

Большинство транспортно-технологических машин (подвижной состав, башенные и железнодорожные краны и др.) эксплуатируются при воздействии внешней среды, статических, ударных и вибрационных нагрузках. Основными элементами, влияющими на надежность работы этих машин, являются рельсы, по которым они перемещаются. Состояние рельсового пути играет важную роль в обеспечении безопасности железнодорожных перевозок пассажирского и грузового транспорта. Увеличение нагрузок и скорости движения подвижного состава приводит к повышению продольного напряжения в рельсах, что может приводить к появлению в них усталостных дефектов и разрушению пути.

В рельсах на прямых участках бесстыкового пути под воздействием силовых нагрузок и температуры окружающей среды возникают продольные механические напряжения. Интервалы допуска на отклонения контролируемых размеров поперечного сечения рельсов от номинальных должны соответствовать значениям, указанным в ГОСТ Р 51685–2022 «Рельсы железнодорожные. Общие технические условия».

Продольные напряжения могут быть как сжимающими, если температура рельса выше температуры закрепления, так и растягивающими, если его температура ниже температуры закрепления. Эти напряжения распространяются вдоль рельса и на разных его участках могут различаться (сжимающие или растягивающие), как по величине, так и по характеру. Это приводит либо к увеличению общего продольного напряжения, либо к его уменьшению. На некоторых участках рельсовой плети могут действовать напряжения, превышающие допустимые пределы [1, 2].

В летний период определенное сочетание различных внешних факторов и повышение температуры на 10 °С может приводить к появлению сжимающей нагрузки в 180 кН и выбросу рельсов, что представляет большую опасность для грузового и пассажирского транспорта. При отрицательной температуре растягивающие силы достигают 1200...1700 кН, что приводит к развитию трещин и разрушению рельсовых стыков.

Обеспечение безопасности движения железнодорожного транспорта связано с выполнением периодического контроля продольных напряжений в рельсах. Это позволяет осуществлять анализ их состояния. В настоящее время контроль угона плетей с изменениями темпера-

турного режима их работы выполняется в соответствии с Инструкцией по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути от 29 декабря 2012 г. № 2788 р.

Для проведения дефектоскопии рельсов разрабатываются различные методы неразрушающего контроля (НК), как в нашей стране [3–7], так и за рубежом [8–10]. К ним относятся механический, электрический, магнитный, оптический, ультразвуковой (УЗ), метод акустоупругости и др. [11]. Большинство средств диагностики рельсов основаны на измерении напряжений в каком-либо его сечении, в результате чего по длине их определять сложно. Поэтому задачи, связанные с измерением продольных напряжений, возникающих в рельсах по длине при эксплуатации пути, являются актуальными [12, 13].

При контроле напряжений бесстыковых участков рельсового пути большой протяженности получил распространение эффект акустоупругости [14–16]. Его принцип действия основан на зависимости механических напряжений от скорости упругих УЗ-волн. Эффективность его тем выше, чем точнее измеряется время распространения акустических волн, что позволяет определять механические напряжения, прочностные свойства и структурное состояние металла рельсов.

Метод акустоупругости может применяться при измерении как одноосных, так и двухосных напряжений и входит в состав УЗ-методов дефектоскопии [17–21]. Однако контроль продольных напряжений, определяемых при измерении характеристик упругих волн, осложняется малым акустоупругим эффектом. Время распространения таких волн составляет единицы, десятки наносекунд (нс), поэтому при его использовании не всегда удается получить устойчивые результаты контроля.

Цель работы – анализ влияния температуры на продольные напряжения в рельсах с использованием эффекта акустоупругости.

Постановка задачи

Погрешности измерения продольных напряжений в рельсах с использованием метода акустоупругости зависят от качества обработки поверхности, физико-механических наклепов на поверхности катания, дефектов, различий свойств рельсов в зависимости от завода-изготовителя, условий закалки, химического состава и др. При этом разность между средним значением измеренных и расчетных значений напряжений не превышает 5 МПа, что соответствует изменению температуры рельса на 2 °С. Следовательно, данным методом можно кон-

тролировать напряжения в плети (состоящей из сварных 100-метровых рельсов длиной 800 м, закрепленных на железобетонных шпалах) при вводе в расчетный температурный интервал.

Работы по измерению напряжений в плетях бесстыкового пути методом акустоупругости разделяются на два этапа:

1) подготовка места установки пьезопреобразователей на объекте контроля (рис. 1);

2) работы по проведению измерений.

Для контроля напряжений в рельсах с использованием эффекта акустоупругости применяются различные типы УЗ-волн (продольные, поперечные, трансформированные). При этом основным измеряемым параметром является время распространения УЗ-сигнала от излучателя до приемника через исследуемый участок рельса.

Температурные зависимости скоростей упругих волн, которые уменьшаются при нагревании материала рельса, определяются в основном температурными зависимостями модулей упругости. Они могут приводить к появлению больших сжимающих и растягивающих напряжений в рельсах, потери устойчивости, излому и выбросу пути. Кроме того, температура влияет на остаточные напряжения в рельсах, возникающие в процессе их изготовления, зависящие от шероховатости и загрязнения их поверхности, качества контакта пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) с рельсом и др. [22].



Рис. 1. Внешний вид установки для контроля продольных напряжений в рельсах с использованием эффекта акустоупругости

Fig. 1. External view of the installation for monitoring longitudinal stresses in rails using the acoustoelastic effect

При проведении экспериментальных исследований на действующем участке пути необходимо измерять температуру рельса в момент определения напряжений, так как она может отличаться от температуры окружающей среды

до 25 °С. Это вызвано в основном прямым воздействием солнечных лучей.

Реальные напряжения в рельсе находятся как

$$\sigma = \sigma_T \pm \sum_0^n \sigma_i,$$

где σ_T – напряжение в рельсе, вызванное температурным влиянием, МПа; n – число действующих факторов; σ_i – напряжение, вызванное i -м фактором, МПа.

Максимальное значение температурного напряжения для термоупрочненных рельсов, которое может быть допущено в бесстыковом пути с учетом действия поездных нагрузок и необходимого запаса прочности, определяется из соотношения

$$[\sigma] \leq \sigma_T + k_n \sigma_k,$$

где k_n – коэффициент запаса прочности; σ_k – напряжения в кромках подошвы рельса от изгиба и кручения под нагрузкой от колес подвижного состава, МПа.

Коэффициент запаса прочности для рельсов первого срока службы и старогодных рельсовых плетей, прошедших диагностирование и ремонт в стационарных условиях или профильное шлифование в пути, $k_n = 1,3$. Для рельсов, пропустивших нормативный тоннаж или переложенных без шлифования, $k_n = 1,4$.

При нахождении плети на шпалах температурное влияние вызывает деформацию в рельсе и приводит к изменению его длины и продольного напряжения. Через температуру закрепления T_3 и температуру рельса T_p определяется напряжение σ_T [6]:

$$\sigma_T = \alpha ET \approx 2,5T = 2,5(T_p - T_3), \quad (1)$$

где α – коэффициент линейного расширения рельсовой стали ($\alpha = 1,18 \cdot 10^{-5}$ 1/град); E – модуль упругости рельсовой стали ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа).

Зная напряжение σ_T и температуру рабочего участка рельса T_p , из формулы (1) можно определить температуру его закрепления T_3 :

$$T_3 = T_p - \frac{\sigma_T}{\alpha E} \approx T_p - \frac{\sigma_T}{2,5}.$$

Из формулы (1) следует, что при изменении температуры рельса T_p на 1 °С относительно температуры его закрепления T_3 в нем возникают температурные напряжения 2,5 МПа.

Сила P_T , вызванная вариацией температуры на ΔT градусов в неподвижной части рельса, определяется как

$$P_T = \sigma_t F = \alpha E \Delta T F, \quad (2)$$

где $F \approx 80 \text{ см}^2$ – площадь поперечного сечения рельса Р65.

Расчеты, выполненные по формуле (2), показывают, что изменение температуры рельса на 10°C приводит к появлению сжимающей или растягивающей силы порядка 200 кН. Контроль за угоном плетей осуществляется по смещению контрольных сечений рельсовой плети относительно маячных шпал.

К началу эксплуатации бесстыкового пути дорожные мастера и бригадиры должны иметь информацию о длинах плетей и температурах их закрепления. Однако ни температура закрепления рельса, ни изменение места положения метки относительно маячных шпал не могут с достаточной точностью определить реальные продольные напряжения, возникающие в рельсе из-за изменения температуры окружающей среды.

Контроль напряжений в рельсах, осуществляемый в данной работе, проводился с использованием тензометрии и эффекта акустоупругости. При испытаниях, применяя эффект акустоупругости, регистрировались различные типы УЗ-волн (продольные, поперечные, трансформированные). При этом основным измеряемым параметром являлось время распространения УЗ-сигнала через исследуемый участок рельса от излучателя до приемника. Температура исследуемого материала также влияет на скорость распространения упругих волн, которая уменьшалась при нагревании материала рельса и зависела в основном от температурных модулей упругости.

Методика исследования

Экспериментальные исследования рельсов проводились в разработанном испытательном стенде (патент РФ 154503. Устройство для создания растягивающего или сжимающего напряжения в рельсе / Глухов Б. В., Курбатов А. Н., Тенилов Е. С., Степанова Л. Н.) с гидравлическим приводом, предназначенным для их растяжения. Стенд установлен в крытом грузовом вагоне на территории учебного полигона СГУПС, что позволяло проводить исследования при различных положительных и отрицательных температурах внешней среды.

При статическом нагружении рельса помимо УЗ-метода использовалась тензометрия. Для этого проволочные тензодатчики типа ПКС-12

наклеивались (сертификат RU.C.28.007.А № 30935, введен в Государственный реестр под № 37343-08) на шейку рельса симметрично с двух сторон.

При создании растягивающих напряжений в отрезке рельса возникали напряжения, которые измерялись микропроцессорной многоканальной тензометрической системой ММТС-64.01 (свидетельство об утверждении типа RU.C.34.007.А № 44412, № 21760-01) класса точности 0,2 [23].

При контроле напряжений с использованием эффекта акустоупругости осуществлялось измерение характеристик волн, распространяющихся в напряженно-упругой среде. При этом использовались два пьезопреобразователя ПЭП типа П 121-2,5-18-002 с углом ввода продольной волны 18° и резонансной частотой 2,5 МГц. Информация записывалась в микропроцессорную УЗ-систему «Акуст-1», работающую на основе эффекта акустоупругости [24]. Пьезодатчик 2 являлся излучателем, а 3 – приемником (рис. 2). Их акустические оси ориентировались навстречу друг другу. Задержка времени распространения УЗ-импульсов с дискретностью в 1 нс измерялась цифровым осциллографом TDS-2014.

На рисунке 2 показана схема способа для измерения высоты рельса и напряжения в нем. При этом в точке *A* осуществлялся ввод УЗ-колебаний продольной *L* и поперечной *T* волны с углами ввода α_L , α_T . В точке *B* проводился прием УЗ-волн, прошедших через рельс и поступивших на преобразователь ПЭП 3, работающий в режиме приема. В точках *C* и *D* происходило отражение и трансформация УЗ-волн от подошвы рельса (патент 2723148 РФ. Ультразвуковой способ определения механических напряжений в рельсах / Степанова Л. Н., Курбатов А. Н.).

Раздельно-совмещенный РС-преобразователь 4 возбуждал и регистрировал продольную волну *L*, распространяющуюся перпендикулярно продольной оси рельса от поверхности катания до подошвы и обратно. Время задержки регистрируемого акустического сигнала, отраженного от подошвы рельса, пропорционально его высоте. Для данного способа контроля напряжений в рельсах точность определения временной задержки сигналов не превышала единиц, десятков микросекунд, поэтому частота дискретизации сигналов составила 100 МГц.

Разработанной микропроцессорной системой «Акуст-1» исследовалось влияние высоты рельса на изменение времени распространения УЗ-волн. Для испытаний были выбраны три

отрезка рельса Р65 высотой 173; 177; 179 мм. На каждый рельс 1 устанавливались два наклонных преобразователя 2 и 3 и один прямой раздельно-совмещенный преобразователь 4.

Контроль температуры выполнялся рельсовым термометром 5 типа ИТ 5- п/п -ЖД с пределом допускаемой погрешности измерения не более $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (рис. 2).

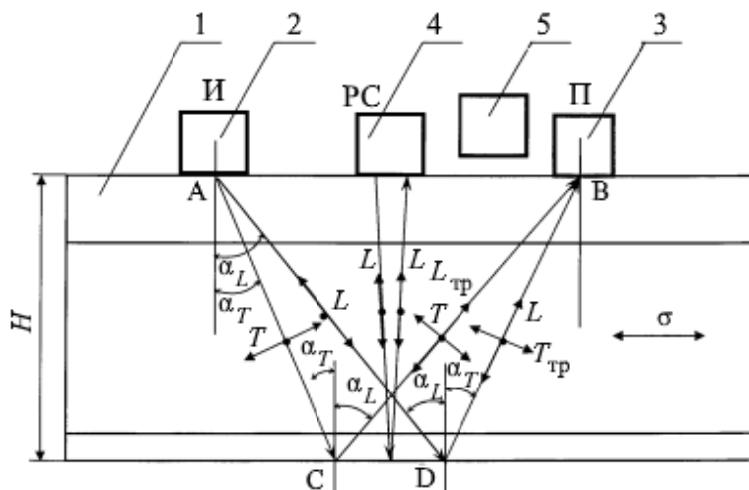


Рис. 2. Схема для измерения напряжения в рельсе с дополнительным контролем его высоты

Fig. 2. Scheme for measuring rail tension with additional control of its height

Раздельно-совмещенный преобразователь 4, состоящий из излучающей и принимающей пьезоэлектрических пластин, размещался между наклонными преобразователями ПЭП 2 и ПЭП 3 на равных расстояниях от них. Излучающая пластина преобразовывала электрические сигналы, поступающие с выхода системы «Акуст-1», в механические колебания продольной УЗ-волны частотой 2,5 МГц. Они распространялись от поверхности катания до подошвы рельса и обратно вдоль его высоты H (рис. 2), которая определялась из формулы

$$H = \frac{C_{L_{\text{пп}}} \tau_{L_{\text{пп}}}}{2}, \quad (3)$$

где $C_{L_{\text{пп}}}$, $\tau_{L_{\text{пп}}}$ – соответственно, скорость, м/с, и время распространения, мкс, продольной УЗ-

волны в области установки прямого РС-преобразователя 4.

Отражаясь от донной поверхности подошвы рельса, продольная УЗ-волну возвращалась на принимающую пьезоэлектрическую пластину, где механические колебания преобразовывались в электрический сигнал τ_{PC}^L , поступающий на вход системы «Акуст-1». При этом измерялось ее время распространения, которое возрастило при увеличении высоты рельса (см. таблицу), определяемого из формулы (3), что может быть связано с увеличением пройденного акустической волной пути и ее скорости. Наклонные пьезопреобразователи ПЭП 2 и ПЭП 3 устанавливались на поверхность катания рельса 1 так, чтобы расстояние между точками ввода продольной УЗ-волны было 90 мм.

Измерение временных параметров распространения УЗ-волн в рельсах с различной высотой

Measurement of time parameters of propagation of ultrasonic waves in rails of different heights

№ рельса	Высота рельса H , мм	τ_{PC}^L , мкс	τ^{LT} , мкс	Напряжение σ , МПа	Отклонение напряжения от среднего значения Δ , МПа	Относительная погрешность δ , %
1	173	67,759	93,115	-116	-11	10
2	177	67,992	94,220	-99	6	6
3	179	68,548	94,904	-101	4	4
Среднее значение	-	-	-	-105	-	-

Наклонный преобразователь ПЭП 2 подключался к выходу системы «Акуст-1» и излучал в рельс продольные и поперечные УЗ-волны, которые распространялись до донной поверхно-

сти его подошвы под углами α_L и α_T (рис. 2). На донной поверхности в точках C и D волны трансформировались из продольных в поперечные, а из поперечных – в продольные. Наклон-

ный преобразователь 3, который подключался на вход системы, принимал трансформированные волны, системой «Акуст-1» измерялось время их распространения τ^{LT} , а компьютер осуществлял обработку информации.

Определение напряжений рельса с учетом его высоты

При исследовании трех рельсов разной высоты для каждой установки преобразователей 2, 3, 4 проводилось от 11 до 14 измерений временных параметров УЗ-волн. Затем находились их средние значения для продольных τ_{PC}^L и трансформированных волн τ^{LT} , после чего результаты измерений обрабатывались, и определялись значения продольных напряжений σ как [24]

$$\sigma = \frac{\tau^{LT} - n\tau_{PC}^L}{kn\tau_{PC}^L}, \quad (4)$$

где τ^{LT} – время распространения сигнала продольной волны, трансформированной на донной поверхности подошвы рельса в поперечную волну при прохождении от излучающего 2 к приемному 3 преобразователю, мкс; τ_{PC}^L – время распространения сигнала продольной волны РС-преобразователя 4, мкс; k – акустоупругий коэффициент, МПа⁻¹; n – коэффициент, учитывающий углы ввода продольных и поперечных волн, определяемый по формуле [24]

$$n = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\cos \alpha_L} + \frac{1}{0,55 \cos \alpha_T} \right), \quad (5)$$

где α_L – угол ввода продольной волны наклонного преобразователя, град; α_T – угол ввода поперечной волны наклонного преобразователя, град.

В процессе испытаний отрезки рельсов с разной высотой 173; 177; 179 мм не нагружались и не были закреплены. При этом регистрировались внутренние остаточные напряжения. Образцы рельсов находились при одинаковой температуре, что контролировалось рельсовым термометром 5 (рис. 2). По полученным данным оценивалось отклонение напряжения от среднего значения Δ и относительная погрешность δ измерения. Из таблицы видно, что при уменьшении высоты рельса H относительная погрешность измерения напряжения δ увеличивалась. Характер напряжений оценивался по отклонению напряжения σ от среднего значения Δ , в которых знак минус соответствовал сжимающим напряжениям, а плюс – преобладанию в образцах рельсов растягивающих напряжений.

Построены зависимости задержки времени распространения волн от напряжений в рельсе при различных температурах (рис. 3). Поперечная и трансформированная УЗ-волны в нагруженном рельсе более подвержены влиянию температуры, чем продольная волна (рис. 3, a).

Время распространения поперечной волны (рис. 3, b) зависит как от механических напряжений в рельсе, так и от температуры. Следовательно, для определения механических напряжений, создаваемых в нагруженном рельсе при различных температурах, необходимо использовать поперечные или трансформированные волны. У этих волн температура рельса оказывает дополнительное влияние на задержку времени их распространения, что вносит погрешность при измерении напряжений. Поэтому необходимо одновременно измерять время распространения УЗ-волн и температуру. Полученные зависимости (рис. 3) показывают, что поперечные и трансформированные волны в измеряемом температурном диапазоне обладают большей чувствительностью по сравнению с продольной волной и с большей достоверностью позволяют проводить мониторинг механических напряжений, возникающих в рельсовых петлях. С уменьшением температуры чувствительность волн к изменению напряжения в рельсах повышается.

Экспериментальная проверка зависимости скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн от температуры проводилась на незакрепленном рельсе. Нагрев осуществлялся в нижней части шейки рельса до температуры +80 °C так, чтобы УЗ-волну проходила через нагретый участок. В процессе остывания термопарой хромель-алюмель регистрировалась температура и через каждые 10 °C цифровым осциллографом TDS-2014 определялось изменение времени распространения УЗ-волн, рассчитывались относительные изменения их скоростей. Экспериментальные зависимости относительного изменения скорости распространения УЗ-волн от температуры для продольных (кривая 1) и поперечных (кривая 2) волн приведены на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, чувствительность поперечной волны выше, чем продольной, что подтверждается рисунком 3, b влияния температуры на задержку времени распространения поперечной волны от температуры. Повышение температуры оказывает большее влияние на скорость распространения поперечной волны. Поэтому при определении продольных напряжений необходимо использовать продольные волны как менее чувствительные к температурным влияниям.

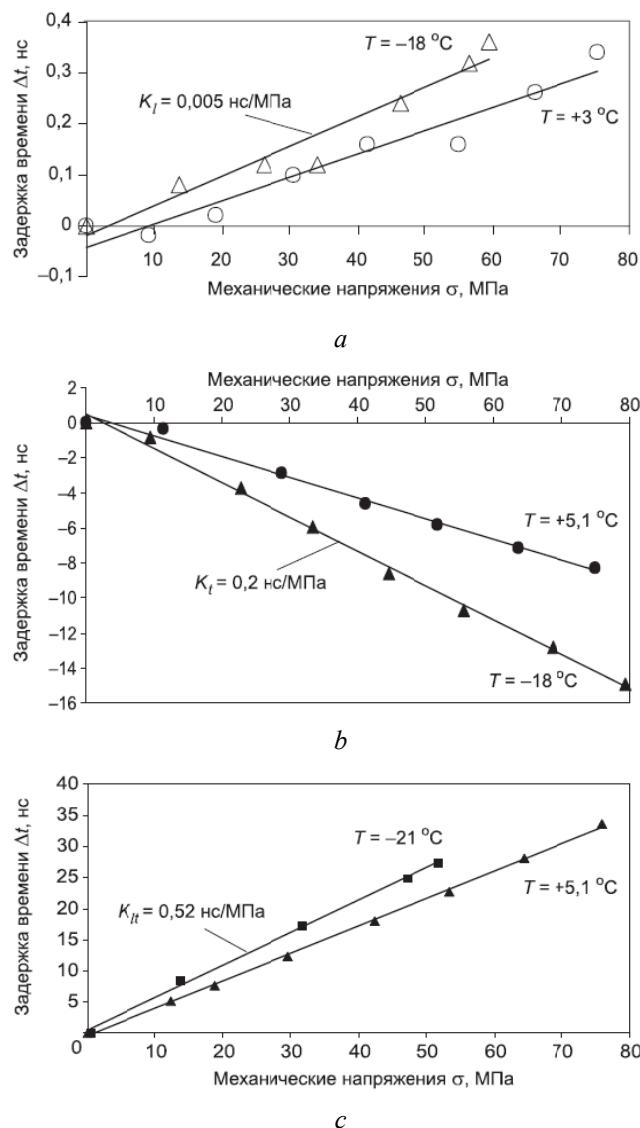


Рис. 3. Зависимость задержки времени распространения продольной (а), поперечной (б) и трансформированной (в) волн от напряжений в рельсе при различных температурах

Fig. 3. Dependence of the propagation time delay of longitudinal (a), transverse (b) and transformed (c) waves on the stresses in the rail at different temperatures

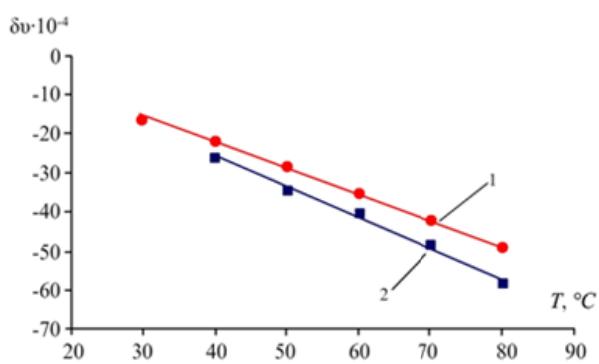


Рис. 4. Зависимость относительного изменения скорости распространения продольных (1) и поперечных (2) волн в рельсе от температуры

Fig. 4. Dependence of the relative change in the propagation velocity of longitudinal (1) and transverse (2) waves in the rail on temperature

На рисунке 5 показаны зависимости напряжения от силы сжатия, полученные в отрезке рельса с использованием эффекта акустоупругости и расчетным методом. Зная времена задержки τ^{LT} , τ_p^L в рельсе и углы ввода УЗ-колебаний продольной α_L и поперечной α_T волн, по формуле (4) можно рассчитать механическое напряжение σ . Коэффициент, учитывающий углы ввода продольных и поперечных волн, определялся из формулы (5).

Расчетное напряжение σ в отрезке рельса Р65 длиной 200 мм при приложении к нему заданной сжимающей нагрузки F находилось по формуле

$$\sigma = \frac{F}{S},$$

где F – нагрузка, Н; S – площадь поперечного сечения отрезка рельса, мм^2 .

Для сравнения были проведены исследования влияния продольных напряжений, возникающих в отрезке рельса длиной 200 мм от приложенной сжимающей нагрузки по его длине. Результаты испытаний контролировались тензометрическим, акустоупругим и расчетным методами (рис. 6).

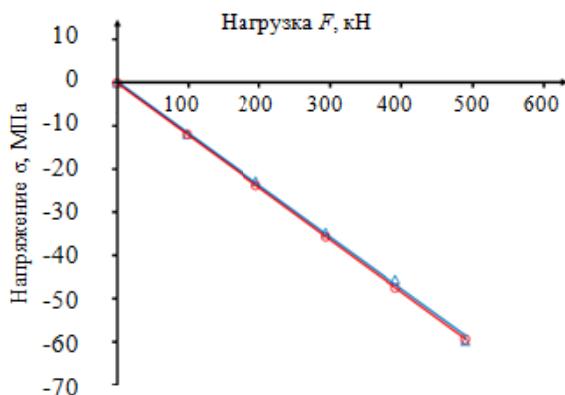


Рис. 5. Зависимости напряжения сжатия в рельсе от нагрузки, полученные с использованием акустоупругим (Δ) и расчетным (\circ) методами

Fig. 5. Dependences of compressive stress in a rail on load, obtained by acoustoelastic Δ and calculation (\circ) methods

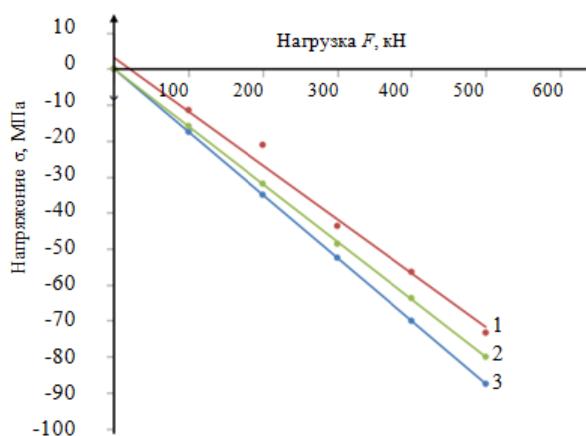


Рис. 6. Зависимости механического напряжения от нагрузки в отрезке рельса, измеренного акустоупругим (1), тензометрическим (2) и расчетным (3) методами

Fig. 6. Dependences of mechanical stress on load in a section of rail measured by acoustic (1), strain gauge (2) and calculation (3) methods

На рисунке 6 наблюдаются небольшие расхождения в экспериментальных зависимостях механических напряжений от нагрузки, полученных акустоупругим (1), тензометрическим (2) и расчетным (3) методами. Следовательно,

измерения напряжений в рельсах методом акустоупругости, основанном на определении времени задержки продольных и трансформированных на донной поверхности волн, позволяют получать результаты, незначительно отличающиеся от тензометрического и расчетного методов.

Выводы

1. Предложен новый способ контроля, позволяющий одновременно определять продольные напряжения в рельсах и их высоту. Показано, что при уменьшении высоты рельса относительная погрешность измерения механического напряжения увеличивается.

2. Получены зависимости задержки времен распространения продольных, поперечных и трансформированных волн от напряжений в рельсе при положительных и отрицательных температурах. Показано, что в измеряемом температурном диапазоне поперечные и трансформированные волны обладают большей чувствительностью по сравнению с продольной волной, следовательно, с большей достоверностью позволяют проводить мониторинг механических напряжений, возникающих в рельсовых панелях. С уменьшением температуры чувствительность волн к изменению напряжения в рельсах повышается.

3. Для определения продольных напряжений в рельсе использовался расчетный метод, эффект акустоупругости и тензометрия. Полученные методом акустоупругости напряжения незначительно отличались от результатов измерений, зарегистрированных тензометрическим и расчетным методами.

Библиографические ссылки

1. Тапков 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

2. Дорофеев Я. В., Овчинников Д. В., Покачий В. А. Системы контроля напряженного состояния рельсовых панелей // Наука и образование транспорту. 2016. № 2. С. 167–170.

3. Контроль термонапряжений в железнодорожных рельсах методом акустической тензометрии / В. М. Бобренко, М. П. Брандис, В. Т. Бобров, В. Ф. Тарабрин // В мире неразрушающего контроля. 2018. Т. 21, № 3. С. 73–76. DOI: 10.12737/article_5b8cf9d14a7692.92384182

4. Хлыбов А. А., Углов А. Л., Рябов Д. А. Об особенностях использования явления акустоупругости при контроле напряженного состояния анизотропного материала технических объектов при отрицатель-

ных температурах // Дефектоскопия. 2021. № 1. С. 23–32. DOI: 10.31857/S0130308221010036

5. Исследование продольных напряжений в железнодорожных рельсах методом акустоупругости / Л. Н. Степанова, А. Н. Курбатов, С. А. Бехер [и др.] // Деформация и разрушение материалов. 2023. № 2. С. 33–40. DOI: 10.31044/1814-4632-2023-2-33-40

6. Определение напряжения сжатия в рельсе с использованием эффекта акустоупругости и тензометрии / Л. Н. Степанова, А. Н. Курбатов, С. И. Кабанов [и др.] // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 7. С. 14–23. DOI: 10.14489/td.2021.07.pp.014-023

7. Ультразвуковая система для определения продольных механических напряжений в рельсах / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, А. Н. Курбатов [и др.] // Датчики и системы. 2023. № 1. С. 31–39. DOI: 10.25728/datsys.2023.1.5

8. Gokhale S., Hurlebaus S. (2008) Monitoring of the stress free temperature in rails using the acoustoelastic effect. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 27, pp. 1368–1373.

9. Vangi D., Virga A. (2007) A practical application of ultrasonic thermal stress monitoring in continuous welded rails. Experimental mechanics, vol. 47, pp. 617–623.

10. Gokhale S. (2007) Determination of applied stresses in rails using the acoustoelastic effect of ultrasonic waves. M.Sc Thesis. Texas A & M University, 112 p.

11. Зверев Б. Н. О методах измерения усилий в пластинах // Путь и путевое хозяйство. 1997. № 10. С. 19–22.

12. Reale S., Pezzati A., Vangi D. (2005) Thermic tensile monitoring with ultrasonic technique in the long-welded rails. Ingegneria Ferroviaria, 60 (12), pp. 991–998.

13. King R.D., Fortunko C.V. (1983) Determination of in-plane residual stress state in plates using horizontally polarized shear waves. Journal of Appl. Phys., no. 54 (6), pp. 3027–3035.

14. Никитина Н. Е., Камышев А. В., Козачек С. В. Применение метода акустоупругости для определения напряжений в анизотропных трубных стальах // Дефектоскопия. 2015. № 3. С. 51–60.

15. Никитина Н. Е. Акустоупругость. Опыт практического применения : монография. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.

16. 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

17. Беляев А. К., Полянский В. А., Третьяков Д. А. Оценка механических напряжений, пластических деформаций и поврежденности посредством акустической анизотропии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 130–151. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.12

18. Никитина Н. Е., Смирнов В. А. Новая технология определения механических напряжений в металлоконструкциях на основе явления акустоупруго-

сти // В мире неразрушающего контроля. 2009. № 1 (43). С. 26–28.

19. Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений / М. Я. Марусина, А. В. Федоров, В. А. Быченок, И. В. Беркутов // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 34–37.

20. Пискарев В. Д. Неразрушающий контроль остаточного ресурса металлических деталей и узлов для объектов машиностроения // Технология легких сплавов. 2011. № 1. С. 81–85.

21. Оценка влияния внешних факторов при ультразвуковом контроле напряженно-деформированных состояний / М. Я. Марусина, А. В. Федоров, В. А. Быченок, И. В. Беркутов // Измерительная техника. 2016. № 11. С. 23–26.

22. 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

23. Тензометрия в транспортном машиностроении : монография / А. Н. Серебренов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов [и др.]. Новосибирск : Наука, 2014. 272 с.

24. Степанова Л. Н., Курбатов А. Н., Тенитилов Е. С. Исследование продольных напряжений в рельсах с использованием эффекта акустоупругости на действующем участке железнодорожного пути // Контроль. Диагностика. 2019. № 2. С. 14–21. DOI: 10.14489/td.2019.02.pp.014-021

References

1. Tapkov K.A. (2018) [Strain stress modeling of differential hardening rails]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 16, no. 2, pp. 78–83. DOI: 10.22213/2410-9304-2018-2-78-83 (in Russ.).
2. Dorofeev Ya.V., Ovchinnikov D.V., Pokatsky V.A. (2016) [Systems for monitoring the stress state of rail strings]. *Nauka i obrazovaniye transport*, no. 2, pp. 167–170 (in Russ.).
3. Bobrenko V.M., Brandis M.P., Bobrov V.T., Tarabrin V.F. (2018) [Thermal Stresses Testing in Railway Rails by Acoustic Tensometry]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya = NDT World*, no. 3. pp. 73–76. DOI: 10.12737/article_5b8cf9d14a7692.92384182 (in Russ.).
4. Khlybov A.A., Uglov A.L., Ryabov D.A. (2021) [On the specific features of using the phenomenon of acoustoelasticity when testing the stress state of anisotropic material of technical objects at subzero temperatures]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 57, no. 1, pp. 21–30. DOI: 10.31857/S0130308221010036 (in Russ.).
5. Stepanova L.N., Kurbatov A.N., Bekher S.A., Kabanov S.I., Tenitilov E.S., Chernova V.V. (2023) [Acoustoelasticity study of the longitudinal stresses in railroad rails]. *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2023, no. 4, pp. 526–532. DOI: 10.31044/1814-4632-2023-2-33-40 (in Russ.).
6. Stepanova L.N., Kurbatov A.N., Kabanov S.I., Tenitilov E.S., Kojemyakin V.L., Chernova V.V. (2021)

- [Determination of the compressive stress of a rail using the effect of acoustoelasticity and strain gauge]. *Kontrol'. Diagnostika*, vol. 24, no. 7, pp. 14-23. DOI: 10.14489/td.2021.07.pp.014-023 (in Russ.).
7. Stepanova L.N., Kabanov S.I., Kurbatov A.N., Yelsov A.E., Chernova V.V. (2023) [Ultrasonic system for determination of longitudinal mechanical stresses in rails]. *Datchiki & Systemi*, no. 1, pp. 31-39. DOI: 10.25728/datsys.2023.1.5 (in Russ.).
8. Gokhale S., Hurlebaus S. (2008) Monitoring of the stress free temperature in rails using the acoustoelastic effect. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol. 27, pp. 1368-1373.
9. Vangi D., Virga A. (2007) A practical application of ultrasonic thermal stress monitoring in continuous welded rails. *Experimental mechanics*, vol. 47, pp. 617-623.
10. Gokhale S. (2007) Determination of applied stresses in rails using the acoustoelastic effect of ultrasonic waves. M.Sc Thesis, Texas A & M University, 112 p.
11. Zverev B.N. (1997) [About methods of measuring forces in tracks]. *Put' i putesvoye khozyaystvo*, no. 10, pp. 19-22 (in Russ.).
12. Reale S., Pezzati A., Vangi D. (2005) Thermic tensile monitoring with ultrasonic technique in the long-welded rails. *Ingegneria Ferroviaria*, no. 60 (12), pp. 991-998.
- 13 King R.D., Fortunko C.V. (1983) Determination of in-plane residual stress state in plates using horizontally polarized shear waves. *Journal of Appl. Phys*, no. 54 (6), pp. 3027-3035.
14. Nikitina N.Y., Kamyshev A.V., Kazachek S.V. (2015) [The application of the acoustoelasticity method for the determination of stresses in anisotropic pipe steels]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 51, no. 3, pp. 171-178 (in Russ.).
15. Nikitina N.E. (2005) *Akustouprugost'. Opyt prakticheskogo primeneniya* [Acoustoelasticity. Practical application experience]. N. Novgorod : TALAM, 208 p. (in Russ.).
16. Murav'ev V.V., Tapkov K.A. (2018) [Evaluation of strain-stress state of the rails in the production]. *Pribory i metody izmerenij*, vol. 8, no 3. pp. 263-270. DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-263-270 (in Russ.).
17. Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Tretyakov D.A. (2020) [Estimating of mechanical stresses, plastic deformations and damage by means of acoustic anisotropy]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, no 4, pp. 130-151. DOI: 10.15593/perm.mech/2020.4.12 (in Russ.).
18. Nikitina N.Ye., Smirnov V.A. (2009) [Stress evaluation in engineering constructions - a new technology based on acoustoelasticity phenomenon]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya = NDT World*, no. 1 (43), pp. 26-28 (in Russ.).
19. Marusina M.Ya., Fedorov A.V., Bychenok V.A., Berkutov I.V. (2014) [Laser-ultrasonic diagnostics of residual stresses]. *Izmeritel'naya tekhnika*, no. 10. pp. 34-37 (in Russ.).
20. Piskarev V.D. (2011) [Non-destructive testing of residual life of metal parts and units for mechanical engineering objects]. *Tekhnologiya legkikh splavov*. no. 1, pp. 81-85 (in Russ.).
21. Marusina M.Ya., Fedorov A.V., Bychenok V.A., Berkutov I.V. (2016) [Evaluation of the influence of external factors during ultrasonic testing of stress-strain states]. *Izmeritel'naya tekhnika*, no. 11, pp. 23-26 (in Russ.).
22. Murav'ev V.V., Yakimov A.V., Kazantsev S.V. (2019) [Distribution of residual stresses and speed of a creep wave in rails]. *Fundamental'nye problemy sovremennoego materialovedeniya = Basic Problems of Material Science*, vol. 16, no. 3, pp. 370376. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2019.03.013 (in Russ.).
23. Sereznov A.N., Stepanova L.N., Kabanov S.I. [et al] (2014) *Tenzometriya v transportnom mashinostroyenii* [Tensometry in transport engineering]. Novosibirsk : Nauka Publ., 272 p. (in Russ.).
24. Stepanova L.N., Kurbatov A.N., Tenitilov E.S. (2019) [Longitudinal stresses investigation in rail using the acoustoelasticity effect on the acting railway track section]. *Kontrol'. Diagnostika*, no. 2, pp. 1421. DOI: 10.14489/td.2019.02.pp.014-021 (in Russ.).

Determining the Influence of Temperature on Longitudinal Stresses in Rails Using the Acoustoelasticity Effect

L.N. Stepanova, PhD in Engineering, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

A.N. Kurbatov, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

S.I. Kabanov, DSc in Engineering, Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin, Novosibirsk, Russia

S.A. Beher, PhD in Engineering, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

V.V. Chernova, DSc in Engineering, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Railway track control is one of the main works necessary to ensure the safety of passenger and freight traffic, both in our country and abroad. In modern conditions, ensuring trouble-free operation of the railway is associated with solving the problems of determining longitudinal stresses in rails caused by the long length of the long-welded rails, increasing the speed of transportation, increasing cargo turnover and the influence of ambient temperature. Longitudinal stresses in rails are greatly influenced by temperature. Due to the lack of temperature compensation in the fixed long-welded rails, rail lashes cannot freely expand and contract when it changes. Exceeding the permissible longitudinal stresses in rails can cause the appearance and development of fatigue cracks, destruction of the rail track and emergency situations, which can lead to their temperature release, loss of stability and bending. Therefore, modern methods of non-destructive testing and diagnostic microprocessor systems are being developed, software for them is being improved. Among the well-known methods of non-destructive testing, acoustic methods (ultrasonic and acoustoelasticity effect) are most widely used, which make it possible to control stresses in rails during the movement of

freight and passenger trains. Principle of action of the effect of acoustoelasticity is based on the dependence of longitudinal stresses on the speed, amplitude and frequency of elastic ultrasonic waves. In this work, the effect of temperature on longitudinal stresses in rails was determined. Using the acoustoelasticity effect, longitudinal, transverse and transformed waves were recorded under normal conditions, as well as at positive and negative ambient temperatures. The main measured parameter is the propagation time of the ultrasonic signal from the emitter to the receiver through the section of the rail. Studies have shown that elastic wave velocities decrease when the rail material is heated and are determined mainly by the temperature relationships of the elastic moduli. Temperature affects residual stresses in rails, which can lead to the occurrence and development of defects. The information obtained during the control of the rails was recorded in the Akusto-1 microprocessor system, operating on the basis of the acoustoelasticity effect. Tensometry was used to confirm the results obtained by this system. Stress control was carried out by a certified multi-channel microprocessor strain gauge system MMTS-64.01 accuracy class 0,2. Proposed is a scheme for control of longitudinal mechanical stresses in rails using longitudinal, transverse and transformed waves. To control the height of the rail, a separate-combined direct converter was additionally installed between the radiating and receiving inclined converters. The developed acoustic control method based on the acoustoelasticity effect makes it possible to determine mechanical stresses in rails with an error not exceeding 10 %, which is permissible for its practical use on the railway.

Keywords: continuous welded track, longitudinal stress, rail, acoustoelasticity, strain measurement, non-destructive testing, ultrasound.

Получено 07.07.2025

Образец цитирования

Определение влияния температуры на продольные напряжения в рельсах с использованием эффекта акустоупругости / Л. Н. Степанова, А. Н. Курбатов, С. И. Кабанов, С. А. Бехер, В. В. Чернова // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 3. С. 64–74. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-64-74

For Citation

Stepanova L.N., Kurbatov A.N., Kabanov S.I., Beher S.A., Chernova V.V. (2025) [Determining the Influence of Temperature on Longitudinal Stresses in Rails Using the Acoustoelasticity Effect]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 3, pp. 64-74. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-3-64-74 (in Russ.).