

УДК 625.171:625.143.482

## Исследование зависимости затухания ультразвуковых колебаний в зависимости от температуры рельсовой стали

Ходак Б. И., Бельтюков В. П.

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Ходак Б. И., Бельтюков В. П. Исследование зависимости затухания ультразвуковых колебаний в зависимости от температуры рельсовой стали // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23. Вып. 1. С. 132–138. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-132-138

### Аннотация

**Цель:** исследование зависимости затухания ультразвуковых колебаний от температуры рельсовой стали, определение влияния температуры на процесс затухания ультразвуковых колебаний. Разработка метода определения температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути при помощи анализа амплитуды ультразвукового сигнала, прошедшего через рельс. **Методы:** проведен анализ теоретических основ распространения ультразвука и влияния температуры рельса на изменение амплитуды ультразвукового сигнала, прошедшего через рельс. Проведены натурные измерения с целью проверки теоретических данных. **Результаты:** определена зависимость затухания ультразвуковых колебаний, прошедших через рельс, от температуры рельса. Получена математическая формула, отражающая зависимость амплитуды ультразвука от температуры рельсовой стали. Определены факторы, влияющие на точность полученных результатов. Показано, что учет зависимости амплитуды ультразвука от температуры рельса важен для повышения точности метода оценки температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути. **Практическая значимость:** результаты исследования позволят разработать более точные и надежные методы мониторинга температурных напряжений в бесстыковом пути, а также могут быть использованы для совершенствования метода определения температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути.

**Ключевые слова:** путевое хозяйство, железнодорожный путь, бесстыковой путь, температурно-напряженное состояние, контроль напряжений

### Введение

В современном мире железнодорожный транспорт играет важную роль в обеспечении мобильности населения и грузоперевозок. На данный момент наиболее перспективным является бесстыковое строение железнодорожного пути [1], представляющее из себя удлиненные рельсы, соединенные между собой с помощью сварки. Благодаря такому решению исключаются удары колес в месте стыковки рельс, что снижает динамические нагрузки и увеличивает срок службы материалов. Кроме того, бесстыковой путь позволяет уменьшить шум и вибрации при движении поездов,

а также сократить затраты на обслуживание и ремонт пути. Однако для успешной эксплуатации данного типа пути следует соблюдать ряд требований к его укладке и обслуживанию. В частности, необходимо обеспечить точное соблюдение геометрических параметров, регулярно проводить осмотры и техническое обслуживание, своевременно устранять выявленные дефекты и повреждения. Недостаточный контроль за состоянием бесстыкового пути и нарушение температурного режима его эксплуатации могут привести к выбросу пути в жаркую погоду и разрыву рельсов при понижении температур. Во избежание нарушений

эксплуатации существуют нормы содержания бесстыкового пути [1]. Основой является контроль температурных напряжений рельсовых плетей бесстыкового пути, так как именно избыточные напряжения могут привести к выбросу. Напряжения в рельсовых плетях определяются по формуле:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot (t_n - t_p), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент расширения рельсовой стали;

$E$  — модуль упругости рельсовой стали;

$t_p$  — температура рельса в момент измерений;

$t_n$  — нейтральная температура рельса, при которой температурные напряжения в рельсе равны нулю.

Существуют различные методы оценки температурных напряжений в рельсах, одним из них является ультразвуковое определение напряжений в рельсовых плетях.

### Ультразвуковые способы контроля температурных напряжений

Ультразвук — звуковые волны частотой выше 20 кГц. Существует несколько методов ультразвуковой диагностики [2, 3], которые теоретически возможно использовать для выявления температурных напряжений:

- **метод измерения скорости распространения ультразвука.** Данный метод основан на зависимости скорости распространения ультразвуковой волны от характеристик среды, в том числе и от температурных напряжений;

- **метод измерения амплитуды ультразвука.** Амплитуда ультразвукового сигнала, прошедшего через участок материала, также зависит от его механических свойств.

В данной статье рассматривается зависимость амплитуды ультразвука, распространяющегося в рельсе, от температуры рельса, а также приводятся результаты эксперимен-

тального исследования данной зависимости с последующим анализом результатов.

### Теоретические основы распространения ультразвука в твердых телах

Распространение ультразвуковых волн в твердых телах — сложный физический процесс, на который оказывают влияние множество факторов [4]. Также при распространении ультразвука возникают различные эффекты, такие как отражение, преломление, дифракция и интерференция. Основными из них, влияющими на затухание ультразвуковых волн [5], являются:

- 1. Поглощение:** ультразвуковые волны поглощаются средой, в которой они распространяются, это приводит к уменьшению амплитуды ультразвука. Степень поглощения зависит от свойств среды, таких как плотность, вязкость, теплопроводность и многих других.

- 2. Рассеивание:** ультразвуковая волна при прохождении через материал рассеивается на неоднородностях среды, таких как пузырьки воздуха или частицы пыли. Рассеивание приводит к изменению направления распространения волны.

- 3. Отражение:** ультразвуковые волны отражаются от границ раздела сред с разными акустическими свойствами. Отражение также может приводить к уменьшению амплитуды.

Для более точного анализа затухания ультразвука необходимо учитывать все эти факторы и их взаимодействие. Однако можно выделить некоторые общие закономерности [7]:

- с повышением температуры обычно увеличивается поглощение и рассеяние ультразвуковых волн, так как изменяются свойства среды, такие как вязкость и плотность;

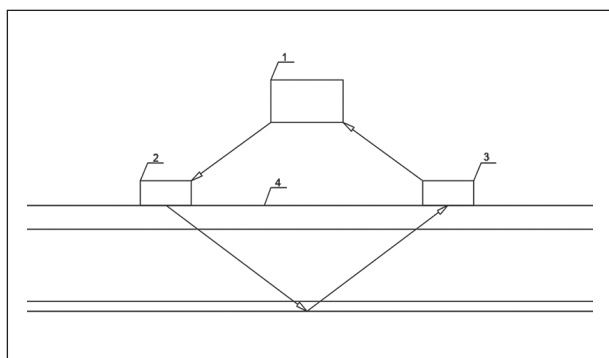
- отражение ультразвука также может зависеть от температуры, но эта зависимость менее выражена.

### Натурные измерения

Для проверки зависимости затухания ультразвуковых колебаний от температуры рельсов был проведен ряд экспериментов, заключающихся в замере амплитуды ультразвукового сигнала, прошедшего через рельс при различных температурах в течение дня. Для исключения влияния механических напряжений, которые возникают в плотно закрепленном рельсе, был выбран свободнолежащий рельс типа Р65 длиной 12,5 м. Измерения проводились при помощи одностороннего дефектоскопа УДС1-РДМ-1М1. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Результаты замеров представлены в табл. 1. Измерения проводились в течение трех дней в утреннее время. Определялась температура рельса, нагреваемого солнечными лучами, а также амплитуда прошедшей через рельс ультразвуковой волны. Время начала измерений, проводимых в первый день, — 10:21–11:48, во второй день — 10:15–12:00, в третий день — 10:15–12:00.

По результатам трех измерений был построен общий график (рис. 2), отражающий зависимость амплитуды принятого сигнала (на оси Y) от температуры рельса (на оси X).



**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — вычислительное устройство; 2 — ультразвуковой излучатель; 3 — ультразвуковой приемник; 4 — рельс 12,5 м

**ТАБЛИЦА 1.** Результаты измерений при повышении температуры рельса

Температура рельса, °С	Амплитуда сигнала, дБ
22,1	9,19
22,3	9,11
23,8	9,07
24,5	9,11
24,7	9,01
25,1	8,99
25,3	8,98
26,3	8,71
26,4	8,88
27,6	8,67
28,1	8,67
28,1	8,65
29,9	8,65
30,1	8,23
30,8	8,04
32,2	8,19
32,3	8,22
33,1	8,03
34,1	8,01
34,2	8,02
34,3	8,08
35,5	7,88
36,2	7,92
36,6	7,99
37,9	7,47
38,2	7,36
38,9	7,48
39,2	7,31
41,3	7,29

После анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что с увеличением температуры рельса на  $19,2^{\circ}\text{C}$  происходит линейное уменьшение амплитуды ультразвукового сигнала примерно на  $1,9\text{ дБ}$ .

На следующем этапе был проведен ряд замеров во время остывания рельса в конце дня. Измерения проводились в течение двух дней в вечернее время. В первый день — 16:20–19:20, во второй день — 16:20–19:40. Результаты представлены в табл. 2.

По результатам первого и второго измерений был построен общий график (рис. 3), отражающий зависимость амплитуды сигнала от температуры рельса.

В полученном графике видно, что при остывании рельса на  $20^{\circ}\text{C}$  происходит увеличение амплитуды ультразвуковой волны на  $1,84\text{ дБ}$ .

По результатам, полученным в ходе всех экспериментов, был построен общий график, на котором отображены результаты всех измерений (рис. 4), построена линия тренда и выявлена

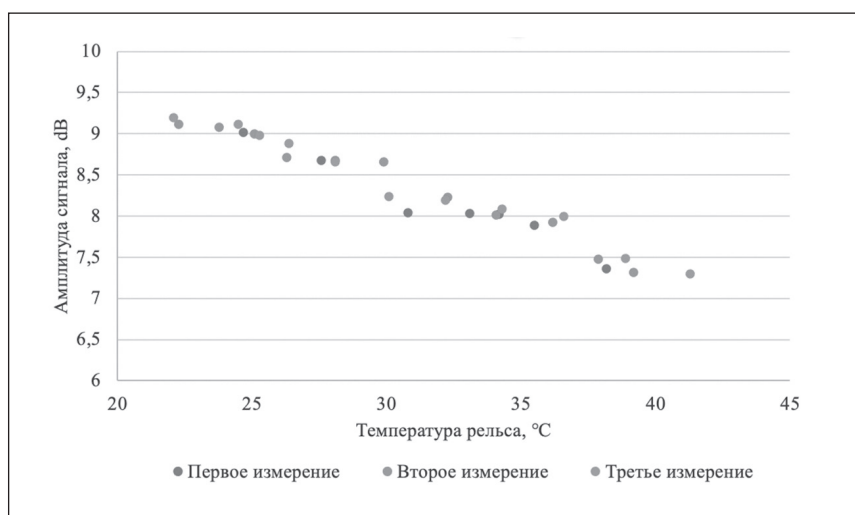


Рис. 2. Графическая зависимость амплитуды сигнала при увеличении температуры рельса

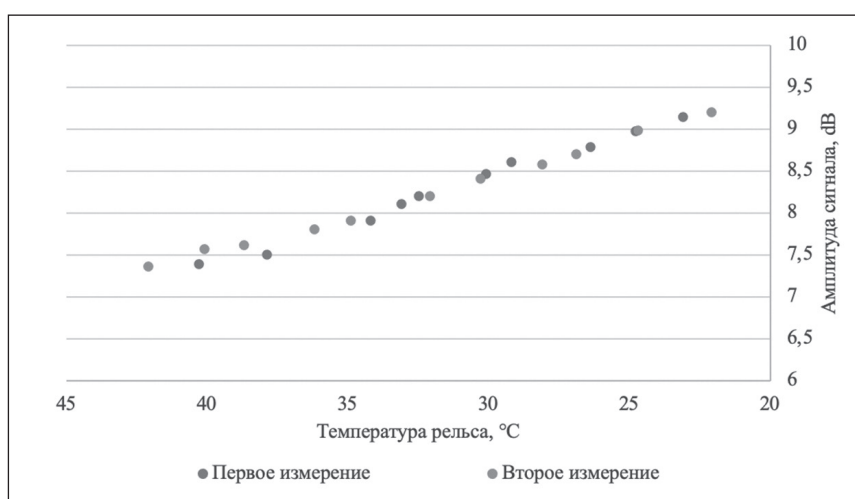


Рис. 3. Графическая зависимость амплитуды сигнала при уменьшении температуры рельса

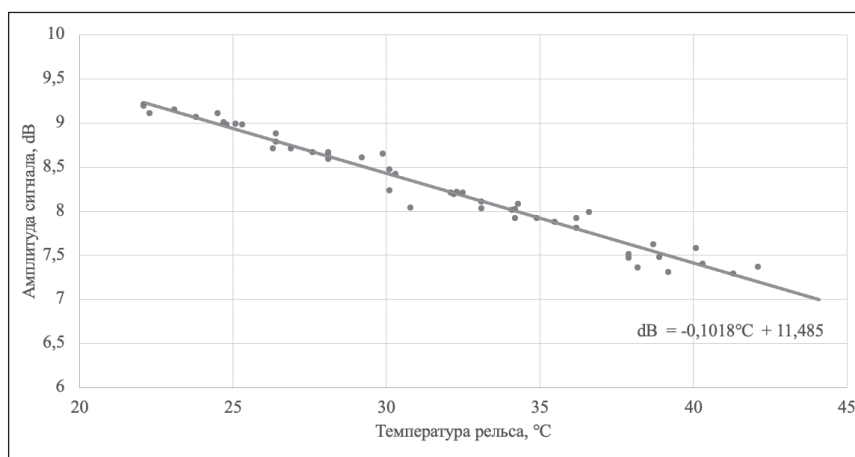


Рис. 4. Графическая зависимость амплитуды сигнала от температуры рельса

ТАБЛИЦА 2. Результаты при понижении температуры рельса

Температура рельса, °С	Амплитуда сигнала, дБ
42,1	7,37
40,3	7,4
40,1	7,58
38,7	7,62
37,9	7,51
36,2	7,81
34,9	7,92
34,2	7,92
33,1	8,11
32,5	8,21
32,1	8,21
30,3	8,42
30,1	8,47
29,2	8,61
28,1	8,59
26,9	8,71
26,4	8,79
24,8	8,98
24,7	8,99
23,1	9,15
22,1	9,21

следующая линейная зависимость (2), описывающая степень затухания ультразвуковой волны в зависимости от температуры рельса:

$$\text{дБ} = -0,1018^\circ\text{C} + 11,485, \quad (2)$$

где °С — относительное изменение температуры рельса;

дБ — относительное изменение амплитуды ультразвукового сигнала.

То есть при изменении температуры рельса на 10 °С амплитуда ультразвуковой волны, прошедшей через рельс, изменяется примерно на 1 дБ. Также стоит отметить, что на полученные результаты могут оказывать влияние тип рельса, сплав, из которого он отлит, и состояние поверхности катания (отшлифованная поверхность, со следами ржавчины и другие различия).

### Выводы

По результатам проведенных экспериментов выявлена линейная зависимость (2) влияния температуры рельса на степень затухания амплитуды ультразвукового сигнала. Можно прийти к выводу, что данный способ контроля температурных напряжений труднореализуем на практике и требует высокой точности оборудования, так как изменение амплитуды примерно в 1 дБ на 10 °С

трудноразличимо, что может создать проблемы при попытке сплошного контроля амплитуды при помощи передвижных средств диагностики. Тем не менее можно сделать вывод о том, что амплитуда ультразвука зависит от температуры рельса, но, к сожалению, изменения в затухании ультразвуковых колебаний, вызванные именно напряжениями, возникающими в рельсах, будут практически неразличимы на фоне изменения амплитуд, вызванных сторонними факторами, такими как различия в геометрических характеристиках рельсов, неравномерность нагрева сечения рельса в течение дня и помех, вызванных передвижением датчиков вдоль рельса при попытке установить данное устройство на движущиеся средства диагностики.

#### Список источников

1. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути (утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р)
2. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
3. Методы акустического контроля металлов / под ред. Н. П. Алешина. М.: Машиностроение, 1989. 456 с.
4. Тюшев А. Н., Дикусар Л. Д. Курс лекций по физике. Ч. 3. Колебания и волны. Волновая оптика: учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Новосибирск: СГГА, 2011. 194 с.
5. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б. С. Касаткин [и др.]. Киев: Техника, 1981. 415 с.
6. Буркин С. П., Шимов Г. В., Андрюкова Е. А. Остаточные напряжения в металлопродукции: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 248 с.
7. Иванов А. И. Поведение металлов при повышенных нестационарных температурах и нагрузках. М.: Metallurgy, 1982. 351 с.
8. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. В. В. Клюева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986.
9. Щербинский В. Г., Алешин Н. П. Ультразвуковой контроль сварных соединений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989.
10. Выявление скрытых дефектов деталей методом ультразвуковой дефектоскопии / С. В. Кривенков [и др.], 1999.

Дата поступления: 29.11.2025

Решение о публикации: 07.02.2026

#### Контактная информация:

ХОДАК Борис Игоревич — аспирант;  
boris120799@inbox.ru

БЕЛЬТЮКОВ Владимир Петрович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Железнодорожный путь»; beltukov@pgups.ru

## An investigation into the thermal dependency of ultrasonic vibration attenuation in steel rail

**Khodak B. I., Beltiukov V. P.**

St. Petersburg State University of Railways of Emperor Alexander I, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russia

**For citation:** *Khodak B. I., Beltiukov V. P.* An investigation into the thermal dependency of ultrasonic vibration attenuation in steel rail // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 1. Pp. 132–138. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-1-132-138. (In Russian)

## Abstract

**Objective:** to explore how temperature variations influence ultrasonic vibration attenuation in rail steel. To propose a methodology for evaluating thermal stresses in continuous welded rails by analyzing the amplitude variations of ultrasonic signals transmitted through the rail structure. **Methods:** the theoretical fundamental principles governing the propagation of ultrasonic waves were examined, with a specific focus on how rail temperature conditions impact on the ultrasonic signal amplitude. Field measurements were carried out to verify the theoretical data. **Results:** a distinct correlation has been established between the rail temperature and the attenuation of ultrasonic vibrations transmitted through the rail. A mathematical expression describing the dependence of ultrasound amplitude on the temperature of the rail steel has been obtained. The study has identified specific variables that could compromise measurement precision. The data demonstrates that integrating temperature-dependent variables into ultrasonic amplitude analysis is crucial for enhancing the precision of current methods used to estimate thermal stresses in continuous welded rail systems. **Practical significance:** the findings of the study will allow the development of more accurate and reliable methods for monitoring thermal stresses in continuous welded rail tracks, and can be used to improve existing techniques for detecting thermal stresses in continuous welded rails.

**Keywords:** track facilities, railway track, continuous welded track, temperature-stress state, stress control

## References

1. Instruktsiya po ustrojstvu, ukladke, sodержaniyu i remontu besstykovogo puti (utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 14.12.2016 No. 2544r) (In Russian)
2. Nerazrushayushchij kontrol': spravochnik: v 7 t. / pod obshch. red. V.V. Klyueva. T. 3: Ul'trazvukovoj kontrol'. M.: Mashinostroenie, 2004. 864 s. (In Russian)
3. Metody akusticheskogo kontrolya metallov / pod red. N. P. Aleshina. M.: Mashinostroenie, 1989. 456 s. (In Russian)
4. Tyushev A.N., Dikusar L.D. Kurs leksij po fizike. Ch. 3. Kolebaniya i volny. Volnovaya optika: ucheb. posobie. 2-e izd., ispr. i dop. Novosibirsk: SGGGA, 2011. 194 s. (In Russian)
5. Eksperimental'nye metody issledovaniya deformatsij i napryazhenij / B.S. Kasatkin [i dr.] Kiev: Tekhnika, 1981. 415 s. (In Russian)
6. Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A. Ostatechnye napryazheniya v metalloproduksii: ucheb. posobie. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2015. 248 s. (In Russian)
7. Ivanov A. I. Povedenie metallov pri povyshennykh nestatsionarnykh temperaturakh i nagruzkakh. M.: Metallurgiya, 1982. 351 s. (In Russian)
8. Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdelij: spravochnik: v 2 kn. Kn. 2 / pod red. V.V. Klyueva. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1986. (In Russian)
9. Shcherbinskij V. G., Aleshin N. P. Ul'trazvukovoj kontrol' svarnykh soedinenij, 2-e izd., pererab. i dop. M.: Strojizdat, 1989. (In Russian)
10. Vyyavlenie skrytykh defektov detalej metodom ul'trazvukovoj defektoskopii / S. V. Krivenkov [i dr.], 1999. (In Russian)

Received: 29.11.2025

Accepted: 07.02.2026

### Author's information:

Boris I. KHODAK — Postgraduate Student;

boris120799@inbox.ru

Vladimir P. BELTIUKOV — Dr. Sci. in Engineering,

Professor of the Department of "Railway Track";

beltukov@pgups.ru