

УДК 534.212; 534.08

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОДНООСНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ

А. А. Карабутов<sup>\*,\*\*\*</sup>, Н. Б. Подымова<sup>\*\*,\*\*</sup>, Е. Б. Черепецкая<sup>\*\*\*</sup>

\* Международный учебно-научный лазерный центр Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

\*\* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва, Россия

\*\*\* Московский горный институт Национального исследовательского технологического университета "МИСиС", 119991 Москва, Россия  
E-mails: aak@ilc.edu.ru, npodymova@mail.ru, echerepetskaya@mail.ru

Предложен и экспериментально реализован лазерно-ультразвуковой метод диагностики механических напряжений сжатия или растяжения в стальных конструкциях, основанный на эффекте акустоупругости. Разработан специальный лазерно-ультразвуковой преобразователь, осуществляющий лазерное возбуждение головных (продольных подповерхностных) ультразвуковых волн и высокочувствительную пьезоэлектрическую регистрацию этих волн. На примере образцов рельсов типа Р65 различного качества показано, что независимо от структурно-фазового состояния рельса имеет место одна и та же линейная зависимость относительного изменения скорости головных ультразвуковых волн от абсолютной величины одноосного напряжения сжатия или растяжения, действующего в рельсе.

Ключевые слова: механические напряжения, эффект акустоупругости, лазерно-ультразвуковой преобразователь, скорость головных ультразвуковых волн.

DOI: 10.15372/PMTF20170315

**Введение.** Продление срока эксплуатации различных металлических конструкций является актуальной задачей, что обуславливает необходимость развития экспериментальных методик оперативной неразрушающей диагностики их напряженно-деформированного состояния. В настоящее время широкое применение находят ультразвуковые методы, основанные на эффекте акустоупругости [1, 2], представляющем собой линейную зависимость относительного изменения скорости ультразвуковых волн в материале от величины напряжений.

Основные ограничения области применения ультразвукового метода обусловлены влиянием на скорость ультразвуковой волны не только напряжений, но и текстуры материала, остаточных напряжений и вариаций его фазового состава [3, 4].

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского технологического университета "МИСиС" среди ведущих мировых научно-образовательных центров (грант № К1-2015-025).

© Карабутов А. А., Подымова Н. Б., Черепецкая Е. Б., 2017

Сложность технической реализации данного метода заключается в том, что относительное изменение скорости ультразвуковых волн в напряженном материале является незначительным по сравнению с их скоростью в материале, находящемся в исходном состоянии. Например, для стали при напряжениях, близких к напряжениям, соответствующим пределу текучести, это изменение не превышает нескольких процентов [5], при значениях напряжений порядка 100 МПа относительное изменение скорости составляет порядка  $10^{-3} \div 10^{-4}$ . Поэтому для достоверного определения значений напряжений требуется высокая точность измерения скорости ультразвуковых волн. Для достижения такой точности целесообразно применение лазерного термооптического механизма возбуждения ультразвука [6]. Применение термооптически возбуждаемых мощных ультразвуковых импульсов с контролируемой временной формой и широким спектральным диапазоном (отношение верхней и нижней частот колебаний может достигать 100) позволяет существенно увеличить точность и временное разрешение измерений скорости ультразвуковых волн по сравнению со случаем использования пьезоэлектрических излучателей.

Целью настоящей работы является разработка лазерного оптико-акустического (лазерно-ультразвукового) метода диагностики напряженно-деформированного состояния стальных конструкций большой протяженности, обусловленного действием одноосных напряжений сжатия или растяжения. Предлагаемый метод основан на прецизионных измерениях фазовой скорости головных (или продольных подповерхностных) акустических волн, распространяющихся в исследуемом объекте вдоль направления действия сжимающей или растягивающей внешней силы. Для проведения таких измерений предлагается использовать широкополосные импульсы головных волн, возбуждаемые при поглощении лазерных импульсов в специальном источнике ультразвука и регистрируемые высокочувствительным широкополосным пьезоэлектрическим приемником.

**1. Эффект акустоупругости.** Для описания эффекта акустоупругости применяется так называемая теория конечных деформаций упругого тела [7], в которой используется нелинейная зависимость между тензорами напряжений и деформаций в виде  $\sigma = M\varepsilon + N\varepsilon^2 + \dots$  ( $M$  — тензор линейных упругих модулей;  $N$  — тензор нелинейных упругих констант третьего порядка).

Для продольной ультразвуковой волны, распространяющейся со скоростью  $c_{X_1}$  в направлении  $X_1$ , справедливо соотношение [1]

$$\rho c_{X_1}^2 = \lambda + 2\mu + A\sigma_{11} + B(\sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность твердого тела;  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{33}$  — напряжения, действующие во взаимно перпендикулярных направлениях  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  соответственно;  $\lambda$ ,  $\mu$  — константы Ламе; коэффициенты  $A$  и  $B$  зависят от нелинейных упругих модулей третьего порядка. Константы Ламе определяют скорость  $c_0$  продольной акустической волны в ненапряженном материале:  $\rho c_0^2 = \lambda + 2\mu$ . Относительное изменение скорости акустической волны, обусловленное наличием в материале напряжений, достаточно мало. Поэтому при наличии в материале только одноосного напряжения растяжения или сжатия (компонента  $\sigma_{11}$  не равна нулю, а компоненты  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  равны нулю) между величиной  $\sigma_{11}$  и изменением скорости продольных акустических волн относительно ее значения в ненапряженном материале существует линейная зависимость

$$\sigma_{11} = A_1 (c_{X_1} - c_0)/c_0, \quad (2)$$

где коэффициент пропорциональности  $A_1 = 2(\lambda + 2\mu)/A$  определяется как линейными, так и нелинейными модулями упругости материала. Из выражения (2) следует, что для определения величины одноосного напряжения необходимо определить изменение скорости продольной акустической волны относительно ее значения в ненапряженном материале.

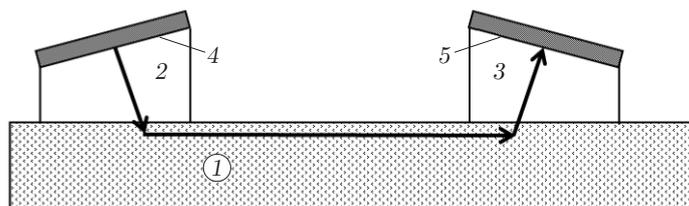


Рис. 1. Схема лазерно-ультразвукового преобразователя:

1 — участок шейки рельса, 2 — источник зондирующих ультразвуковых импульсов, 3 — широкополосный пьезоэлектрический приемник, 4 — пластина из светопоглощающего пластика, 5 — пьезополимерная пленка

**2. Принцип работы лазерно-ультразвукового преобразователя и методика измерения скорости головных ультразвуковых волн.** В настоящей работе для диагностики одноосных сжимающих и растягивающих напряжений в стальных конструкциях, в частности в образцах рельсов, в качестве зондирующих ультразвуковых импульсов предлагается использовать возбуждаемые лазером широкополосные импульсы головных (продольных подповерхностных) ультразвуковых волн. Головная волна — это продольная волна, возбуждаемая при падении зондирующей продольной волны из излучателя на поверхность диагностируемого объекта под углом, близким к первому критическому для материалов звукопровода излучателя и этого объекта [8]. Головные волны распространяются в поверхностном слое исследуемого объекта и практически не зависят от шероховатости и кривизны его поверхности. При распространении головной волны вдоль диагностируемого объекта (например, рельса) обеспечивается максимальная чувствительность диагностической системы к наличию в рельсе напряжений растяжения или сжатия, поскольку направления действия этих напряжений и распространения зондирующей волны совпадают.

Схема лазерно-ультразвукового преобразователя для возбуждения и регистрации широкополосных импульсов головных ультразвуковых волн представлена на рис. 1. Для проведения измерений скорости головных волн, распространяющихся вдоль рельса, преобразователь жестко закрепляется на механически зачищенном участке шейки рельса.

Источник зондирующих ультразвуковых импульсов и широкополосный пьезоэлектрический приемник конструктивно совмещены в корпусе преобразователя. Источник представляет собой пластину из специального пластика, в которой поглощается лазерный импульс и которая находится в жестком акустическом контакте с призмой-звукопроводом. Призма изготовлена из оргстекла таким образом, что термооптически возбуждаемый в пластине ультразвуковой сигнал падает на поверхность рельса под углом, приближенно равным  $20^\circ$ . Это значение близко к значению первого критического угла, при котором продольная ультразвуковая волна проходит через границу раздела оргстекло — сталь. Таким образом, под поверхностью шейки рельса практически параллельно ее внешней поверхности распространяется широкополосный ультразвуковой импульс головных волн, для регистрации которого используется пьезополимерная пленка, приклеенная на призму-звукопровод приемника ультразвука. Эта призма идентична звукопроводу источника ультразвука, что обеспечивает возможность регистрировать импульс головных волн, выходящий из рельса, попадающий в звукопровод приемника и распространяющийся в нем практически по нормали к плоскости пьезопленки. Акустический контакт преобразователя с рельсом осуществляется через тонкий иммерсионный слой жидкости.

Скорость головной ультразвуковой волны, распространяющейся под поверхностью шейки рельса, вычисляется по формуле

$$c_h = L/(\tau_1 - \tau_2 - \tau_3), \quad (3)$$

где  $\tau_1$  — временной интервал между моментом регистрации импульса головных волн и моментом излучения лазерного импульса;  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  — времена пробега ультразвукового импульса в призмах-звукопроводах источника ультразвука и пьезоприемника соответственно;  $L$  — длина базы измерений, т. е. расстояние между точками входа в рельс и выхода из него импульса головных волн. Скорость  $c_h$  в выражении (3) эквивалентна скорости  $c_{X_1}$ , введенной выше (см. (1)) для случая распространения продольных ультразвуковых волн вдоль направления действия одноосного напряжения сжатия или растяжения. Величины  $L$ ,  $\tau_2$ ,  $\tau_3$  являются техническими характеристиками преобразователя и определяются с использованием методики калибровки (измерение времени пробега ультразвукового импульса в трех образцах при известном значении скорости головных волн). Таким образом, единственной измеряемой величиной при ультразвуковой диагностике напряженного состояния рельсов является временной интервал  $\tau_1$  (см. (3)). Следовательно, на точность измерения скорости  $c_h$  оказывает влияние только погрешность определения  $\tau_1$ , которая в свою очередь определяется нестабильностью момента регистрации импульса головных волн, прошедшего расстояние  $L$  в рельсе. Для используемого в данной работе лазерно-ультразвукового преобразователя сумма времен  $\tau_2$  и  $\tau_3$  равна 5,058 мкс, а длина базы измерений  $L$  составляет 29,797 мм. Такое значение  $L$  позволяет разделить моменты регистрации импульса головных волн, прошедшего в рельсе, и электрических шумовых сигналов, возникающих в момент излучения лазерного импульса.

**3. Схема экспериментальной установки.** На рис. 2 представлена схема установки для лазерно-ультразвуковой диагностики одноосных напряжений сжатия или растяжения в образцах рельсов. Основными компонентами установки являются лазерно-ультразвуковой преобразователь, сопряженный с оптоволоконном для передачи лазерных импульсов в источник ультразвука и с электрическим кабелем для передачи сигналов с пьезоприемника в скоростной аналого-цифровой преобразователь; оптоэлектронный блок,

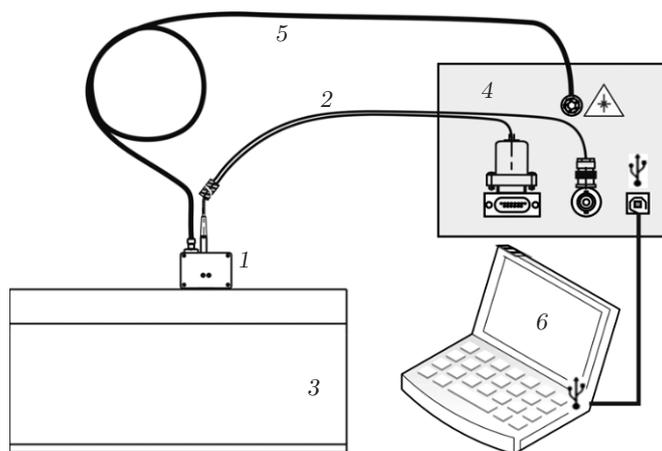


Рис. 2. Схема установки для лазерно-ультразвуковой диагностики одноосных напряжений в рельсах:

1 — лазерно-ультразвуковой преобразователь, 2 — оптоволоконно для передачи лазерных импульсов в источник ультразвука, 3 — образец рельса, 4 — оптоэлектронный блок, 5 — электрический кабель для передачи сигналов с пьезоприемника в аналого-цифровой преобразователь, 6 — персональный компьютер

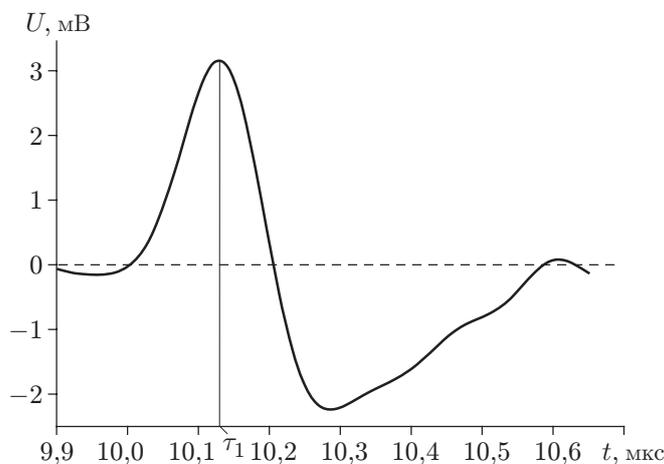


Рис. 3. Зависимость импульса напряжений  $U$ , зарегистрированного при распространении головных ультразвуковых волн под поверхностью шейки образца рельса, от времени

в котором размещены импульсный Nd:YAG-лазер с модуляцией добротности с диодной накачкой, адаптер электрического питания усилителя пьезоприемника и аналого-цифровой преобразователь; персональный компьютер с программным обеспечением для автоматизированного сбора, обработки сигналов и результатов измерений.

На рис. 3 показан временной профиль импульса напряжений головных ультразвуковых волн, зарегистрированный при их распространении в шейке рельса. Начало временной шкалы соответствует моменту излучения лазерного импульса. Положение точки максимума  $\tau_1$  определяется с точностью до  $1,5 \div 2,0$  нс, что обусловлено нестабильностью момента регистрации импульса головных волн. Для данного образца  $\tau_1 = (10,129 \pm 0,002)$  мкс, скорость головных ультразвуковых волн в его шейке равна  $c_h = (5876 \pm 2)$  м/с. Вследствие нестабильности определения значения  $\tau_1$  абсолютная погрешность измерения скорости головных ультразвуковых волн составляет  $2 \div 3$  м/с.

**4. Исследованные образцы рельсов и методика их испытаний на сжатие и растяжение.** Эксперименты по механическому сжатию и растяжению образцов рельсов проводились с использованием технического оборудования экспериментальной лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта.

Для изучения влияния структурно-фазового состояния рельса на зависимость скорости ультразвуковых волн от величины действующего в нем напряжения были выбраны образцы рельсов различного качества.

Для испытаний на одноосное сжатие из новых рельсов были вырезаны четыре образца длиной 40 см. Образцы 1 и 2 были вырезаны из объемно термоупрочненных рельсов типа Р65-ОТ350-Э76Ф ГОСТ Р 51685-2013 производства Новокузнецкого и Нижнетагильского металлургических комбинатов, образец 3 — из объемно термоупрочненного рельса производства Японии, аналогичного российскому рельсу типа Р65-ОТ350-Э76Ф, образец 4 — из нетермоупрочненного рельса производства Польши (российский аналог — Р65-НТ320-Э76ХСФ ГОСТ Р 51685-2013).

Имевшиеся технические возможности не позволили провести механические испытания на сжатие и растяжение образцов, вырезанных из одних и тех же рельсов.

Для испытаний на растяжение, проведенных через несколько месяцев после испытаний на сжатие, были изготовлены четыре образца длиной 40 см из других новых рельсов. При этом тип и качество рельсов были теми же, что и для образцов в экспериментах на

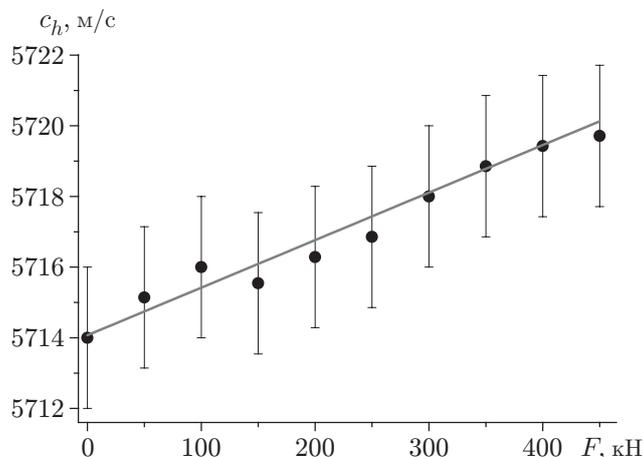


Рис. 4. Зависимость скорости головных волн, распространяющихся под поверхностью шейки образца рельса 4, от величины сжимающей силы

сжатие. Образцы 5, 6 были вырезаны из рельсов типа Р65-ОТ350-Э76Ф производства Новокузнецкого и Нижнетагильского металлургических комбинатов, образец 7 — их японский аналог, образец 8 — польский аналог рельса типа Р65-НТ320-Э76ХСФ. Однако, поскольку эти рельсы были изготовлены в другое время, массовые доли легирующих элементов в стали могли отличаться от соответствующих величин для образцов, испытанных на сжатие, в пределах, допускаемых ГОСТ Р 51685-2013.

Каждый образец рельса вместе с закрепленным на его шейке лазерно-ультразвуковым преобразователем подвергался одноосному сжатию или растяжению в универсальной испытательной машине. Величина сжимающей или растягивающей силы  $F$  менялась в интервале от нуля до 450 кН с шагом 50 кН. При каждом фиксированном значении  $F$  измерялась скорость  $c_h$  головных ультразвуковых волн, распространяющихся вдоль продольной оси рельса. Температура образцов контролировалась с помощью датчика температуры, закрепленного на рельсе в непосредственной близости от преобразователя. В ходе измерений при испытаниях на сжатие температура менялась в диапазоне  $24 \div 25$  °С, при испытаниях на растяжение — в диапазоне  $24,3 \div 25,5$  °С. Поскольку температурный коэффициент изменения скорости продольных ультразвуковых волн в рельсовой стали составляет приблизительно  $-0,7$  (м/с)/°С [9], изменение скорости ультразвуковых волн в образцах при изменении температуры не превышало погрешности измерений. Поэтому считалось, что все измерения проводились при постоянной температуре.

**5. Результаты экспериментов и их обсуждение.** На рис. 4 представлена зависимость скорости головных волн  $c_h$ , распространяющихся под поверхностью шейки образца 4, от величины сжимающей силы  $F$ . Скорость  $c_h$  — среднее значение, полученное в результате 10 измерений при фиксированной величине  $F$ . Аналогичная зависимость скорости головных волн от сжимающей силы имела место для всех остальных образцов. Однако для разных образцов в ненагруженном состоянии ( $F = 0$ ) скорость  $c_{h0}$  оказалась различной, что обусловлено различием их структурно-фазового состояния. С использованием метода наименьших квадратов зависимости  $c_h(F)$  были аппроксимированы возрастающими линейными функциями вида  $y = a + bx$ . Значения  $c_{h0}$ , а также параметры аппроксимации  $a$ ,  $b$  и среднеквадратичные погрешности их определения приведены в табл. 1. Для всех образцов параметр  $a$  в пределах погрешности совпадает со значением  $c_{h0}$ . Коэффициент наклона прямых  $b = dc_h/dF$ , осредненный по данным для четырех образцов, равен  $\langle b \rangle = (1,15 \pm 0,15) \cdot 10^{-2}$  (м/с)/кН. Коэффициент  $b$  характеризует зависимость скорости

Таблица 1

Скорость головных ультразвуковых волн в ненагруженном состоянии и параметры линейной аппроксимации для зависимости скорости головных волн от сжимающей нагрузки в исследованных образцах рельсов

Номер образца	$c_{h0}$ , м/с	$a$ , м/с	$b \cdot 10^2$ , (м/с)/кН
1	5779	$5779,0 \pm 0,2$	$1,05 \pm 0,08$
2	5791	$5791,1 \pm 0,2$	$1,15 \pm 0,07$
3	5834	$5834,0 \pm 0,3$	$1,03 \pm 0,11$
4	5714	$5714,1 \pm 0,2$	$1,35 \pm 0,09$

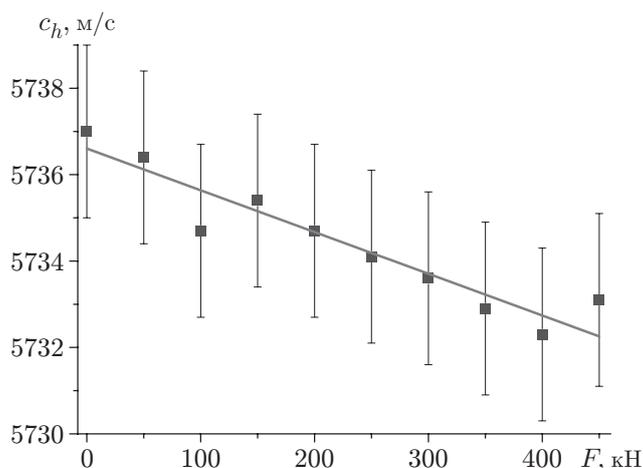


Рис. 5. Зависимость скорости головных волн, распространяющихся под поверхностью шейки образца рельса 5, от величины растягивающей силы

головных волн от сжимающей нагрузки и в пределах относительной погрешности, приближенно равной 13 %, одинаков для четырех исследованных образцов рельсов.

На рис. 5 представлена зависимость скорости головных волн  $c_h$ , распространяющихся под поверхностью шейки образца 5, от величины растягивающей силы  $F$ . Аналогично экспериментам на сжатие в качестве величины  $c_h$  было выбрано среднее значение, полученное в результате 10 измерений при фиксированной величине  $F$ . Аналогичная зависимость скорости головных волн от растягивающей силы имела место для всех остальных образцов. Для разных образцов в ненагруженном состоянии скорость головных ультразвуковых волн  $c_{h0}$  также оказалась различной вследствие различия структурно-фазового состояния образцов. С использованием метода наименьших квадратов зависимости  $c_h(F)$  были аппроксимированы убывающими линейными функциями вида  $y = a - bx$ . Значения  $c_{h0}$ , а также параметры аппроксимации  $a$ ,  $b$  и среднеквадратичные погрешности их определения приведены в табл. 2. Как и в экспериментах на сжатие, для всех образцов параметр  $a$  в пределах погрешности совпадает со значением  $c_{h0}$ , а коэффициент наклона прямых  $b = dc_h/dF$ , осредненный по данным для четырех образцов, равен  $\langle b \rangle = (1,15 \pm 0,17) \cdot 10^{-2}$  (м/с)/кН. В пределах относительной погрешности, приближенно равной 15 %, значение  $b$  оказалось одинаковым для всех исследованных образцов. Кроме того, в пределах погрешности измерений значения коэффициента  $\langle b \rangle$  одинаковы и в случае сжимающей нагрузки, и в случае растягивающей.

Величина одноосного напряжения сжатия или растяжения  $\sigma_{11}$ , возникающего в рельсе при приложении известной продольной силы  $F$ , рассчитывается по формуле  $\sigma_{11} = F/S$ , где

Таблица 2

Скорость головных ультразвуковых волн в ненагруженном состоянии и параметры линейной аппроксимации для зависимости скорости головных волн от растягивающей нагрузки в исследованных образцах рельсов

Номер образца	$c_{h_0}$ , м/с	$a$ , м/с	$b \cdot 10^2$ , (м/с)/кН
5	5737	$5736,6 \pm 0,3$	$0,96 \pm 0,12$
6	5748	$5748,5 \pm 0,3$	$1,11 \pm 0,11$
7	5752	$5751,8 \pm 0,3$	$1,13 \pm 0,11$
8	5696	$5695,3 \pm 0,3$	$1,38 \pm 0,11$

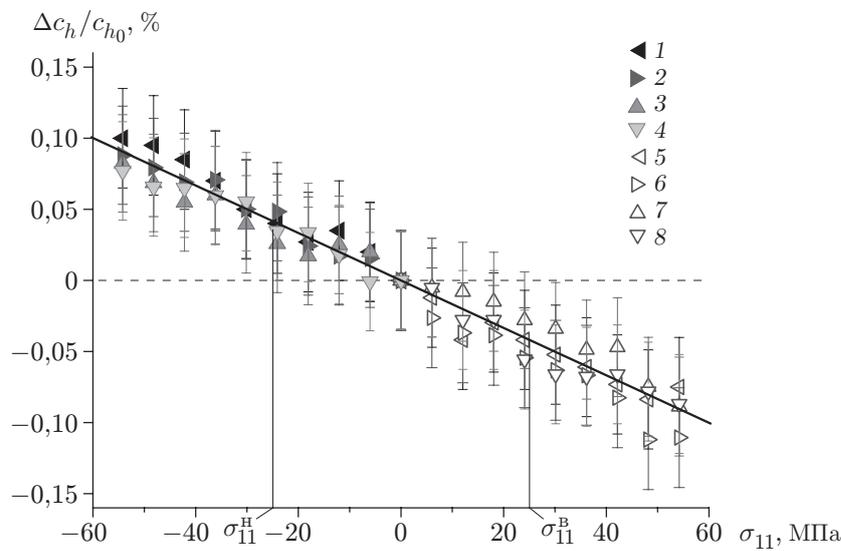


Рис. 6. Зависимость относительного изменения скорости головных волн от приложенного одноосного напряжения сжатия или растяжения в исследованных образцах рельсов типа Р65:

$\sigma_{11}^H, \sigma_{11}^B$  — нижнее и верхнее пороговые значения напряжения; 1 —  $c_{h_0} = 5714$  м/с, 2 —  $c_{h_0} = 5791$  м/с, 3 —  $c_{h_0} = 5834$  м/с, 4 —  $c_{h_0} = 5779$  м/с, 5 —  $c_{h_0} = 5737$  м/с, 6 —  $c_{h_0} = 5696$  м/с, 7 —  $c_{h_0} = 5748$  м/с, 8 —  $c_{h_0} = 5752$  м/с

$S$  — площадь поперечного сечения рельса. Для исследованных образцов рельсов типа Р65  $S = 82,6$  см<sup>2</sup>. Таким образом, в проведенных экспериментах максимальные напряжения сжатия или растяжения, возникающие при приложении максимальной продольной сжимающей или растягивающей силы  $F_{max} = 450$  кН, равны  $\sigma_{max} = \pm 54,5$  МПа. Напряжения сжатия считаются отрицательными, напряжения растяжения — положительными.

Как отмечено выше, для восьми исследованных образцов скорость головных ультразвуковых волн  $c_{h_0}$  в ненапряженном состоянии оказалась различной (см. табл. 1, 2), поэтому анализировалось относительное изменение скорости этих волн — величина  $(c_h - c_{h_0})/c_{h_0} = \Delta c_h/c_{h_0}$  при различных сжимающих и растягивающих нагрузках. Для всех исследованных образцов рельсов при воздействии сжимающих напряжений  $\Delta c_h/c_{h_0} > 0$ , при воздействии растягивающих напряжений  $\Delta c_h/c_{h_0} < 0$ . Однако при одних и тех же абсолютных значениях сжимающего или растягивающего напряжения  $|\sigma_{11}|$  модуль относительного изменения скорости головных ультразвуковых волн  $|\Delta c_h/c_{h_0}|$  в пределах погрешности измерений скорости этих волн оказался одинаковым для всех образцов. Таким образом, представленные на рис. 6 зависимости  $\Delta c_h/c_{h_0}(\sigma_{11})$  для восьми образцов рельсов с уче-

том знаков  $\Delta c_h/c_{h_0}$  и  $\sigma_{11}$  могут быть аппроксимированы с использованием метода наименьших квадратов одной и той же линейно убывающей функцией  $y = -(1,67 \pm 0,04) \cdot 10^{-3}x$ . Следовательно, относительное изменение скорости головных ультразвуковых волн определяется только величиной действующего в образце рельса напряжения и не зависит от структурно-фазового состояния рельса. С использованием полученной линейной функции по измеренному экспериментально значению  $\Delta c_h/c_{h_0}$  может быть вычислено локальное напряжение  $\sigma_{11}$  в рельсе:

$$\sigma_{11} = -5,99 \cdot 10^2 (\Delta c_h/c_{h_0}).$$

Локальность определения напряжения в продольном направлении (вдоль рельса) соответствует длине базы измерений лазерно-ультразвукового преобразователя и составляет приблизительно 30 мм. Порог детектирования напряжения сжатия или растяжения в рельсе составляет  $\pm 25$  МПа.

**Заключение.** В работе предложен и экспериментально реализован лазерно-ультразвуковой метод количественной диагностики одноосных механических напряжений сжатия или растяжения в стальных конструкциях большой протяженности. Применение специально разработанного лазерно-ультразвукового преобразователя позволяет выполнить прецизионные измерения скорости головных ультразвуковых волн с абсолютной погрешностью  $2 \div 3$  м/с при малой длине базы измерений, приближенно равной 30 мм. С использованием этих характеристик можно проводить диагностику неоднородного распределения одноосных напряжений сжатия или растяжения в конструкциях большой протяженности. На примере образцов рельсов типа Р65 показана возможность достоверной диагностики одноосных напряжений сжатия и растяжения в рельсе в диапазоне  $\pm 55$  МПа при пороге детектирования  $\pm 25$  МПа.

По результатам измерений скорости головных ультразвуковых волн в восьми образцах рельсов различного качества получена общая для всех образцов линейная зависимость относительного изменения скорости этих волн от абсолютной величины одноосного напряжения сжатия или растяжения, действующего в рельсе. Показано, что структурно-фазовое состояние рельса не влияет на характер этой зависимости.

Исследованные в настоящей работе напряжения возникают в жестко закрепленной с обоих концов рельсовой плети, если ее температура увеличивается (одноосное напряжение сжатия) или уменьшается (одноосное напряжение растяжения). Поэтому предложенный лазерно-ультразвуковой метод является перспективным для разработки системы раннего обнаружения предкритического состояния рельсовых плетей бесстыкового пути.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Гузь А. Н.** Введение в акустоупругость / А. Н. Гузь, Ф. Г. Махорт, О. И. Гуца. Киев: Наук. думка, 1977.
2. **Никитина Н. Е.** Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005.
3. **Никитина Н. Е., Павлов И. С.** О специфике явления акустоупругости в двумерной среде с внутренней структурой // Акуст. журн. 2013. Т. 59, № 4. С. 452–458.
4. **Горкунов Э. С., Задворкин С. М., Мушников А. Н. и др.** Влияние механических напряжений на магнитные характеристики трубной стали // ПМТФ. 2014. Т. 55, № 3. С. 181–191.
5. **Семухин Б. С., Зуев Л. Б., Бушмелева К. И.** Скорость ультразвука в низкоуглеродистой стали, деформируемой на нижнем пределе текучести // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 3. С. 197–201.
6. **Гусев В. Э.** Лазерная оптоакустика / В. Э. Гусев, А. А. Карабутов. М.: Наука, 1991.
7. **Munaghan F. D.** Finite deformation of elastic solid. N. Y.: John Wiley and Sons, 1951.

8. **Ермолов И. Н.** Ультразвуковой контроль. Неразрушающий контроль: Справ. / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3.
9. **Бехер С. А., Курбатов А. Н., Степанова Л. Н.** Использование эффекта акустоупругости при исследовании механических напряжений в рельсах // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщ. 2013. № 2. С. 104–111.

*Поступила в редакцию 2/III 2016 г.,  
в окончательном варианте — 7/IV 2016 г.*

---