

УДК 620.179
ББК ЖЗ

**ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА
ПРОДОЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
РЕЛЬСОВЫХ ПЛЕТЕЙ¹**

**Карабутов А. А.², Жаринов А. Н.³, Ивочкин А. Ю.⁴,
Каптильный А. Г.⁵, Карабутов А. А. (мл.)⁶,
Ксенофонтов Д. М.⁷, Кудинов И. А.⁸, Симонова В. А.⁹**
*(Международный учебно-научный лазерный центр МГУ
имени М.В. Ломоносова, г. Москва)*
Мальцев В. Н.¹⁰

*(Центр диагностики и мониторинга устройств
инфраструктуры Московской дирекции инфраструктуры,
ОАО «РЖД», г. Москва)*

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №11-02-13108-офи-м-2011-РЖД.

² Александр Алексеевич Карабутов, доктор физико-математических наук, профессор (aak@ilc.edu.ru).

³ Алексей Николаевич Жаринов, научный сотрудник (zharinov.alexey@gmail.com).

⁴ Александр Юрьевич Ивочкин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (ivochkin@yandex.ru).

⁵ Александр Григорьевич Каптильный, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (drc@pochta.ru).

⁶ Александр Александрович Карабутов, аспирант (akarabutov@gmail.com).

⁷ Дмитрий Михайлович Ксенофонтов, аспирант (ksenofontov@physics.msu.ru).

⁸ Игорь Александрович Кудинов, инженер (igor@optoacoustics.ru).

⁹ Варвара Аркадьевна Симонова, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник (varvara.simonova@gmail.com).

¹⁰ Виктор Николаевич Мальцев, начальник отдела (victor.malits@mail.ru).

Разработан лазерно-ультразвуковой метод определения величины остаточных напряжений в рельсах. Метод основан на лазерном возбуждении подповерхностной ультразвуковой волны и ее регистрации пьезоэлектрическим приемником. Величина остаточных напряжений в металле определяется по скорости распространения ультразвукового импульса. Был создан лазерно-ультразвуковой преобразователь, осуществляющий возбуждение и регистрацию подповерхностных ультразвуковых волн. На основе проведенного теоретического анализа связи скорости распространения ультразвуковых волн и величины остаточных напряжений был предложен и экспериментально реализован способ абсолютной калибровки метода, основанный на создании напряжений в образце гидронатяжителем УНГ-75. В результате калибровки экспериментально получена линейная зависимость между относительным изменением скорости (десятые доли процента) и приложенным напряжением сжатия/растяжения в области обратимых деформаций.

Ключевые слова: лазерная ультразвуковая диагностика, акусто-упругий эффект, напряжённые состояния, остаточные напряжения.

1. Введение

Наличие механических напряжений в материале сильно влияет на механические свойства и эксплуатационные качества изделий и конструкций. Так, растягивающие напряжения могут сильно снизить срок службы изделия, приводя к росту трещин и разрушению материала, а сжимающие – наоборот, способны повысить устойчивость деталей по отношению к внешним нагрузкам. Металлические конструкции широко используются в разных областях промышленности. К таким конструкциям относятся рельсы. Срок их эксплуатации напрямую зависит от того, в каких климатических условиях они используются. Сжимающие напряжения, возникающие при низких температурах и

растягивающие напряжения при высоких температурах, способны снизить срок эксплуатации рельсовых плетей.

Задача продления срока эксплуатации деталей и конструкций приводит к развитию методик измерения остаточных напряжений, возникающих при эксплуатации и обработке деталей и конструкций. Остаточные напряжения возникают при механических нагрузках в процессе эксплуатации изделий, при сварке, а также при различной обработке поверхности.

Целью данной работы является определение способности применения лазерно-ультразвукового метода неразрушающего контроля для анализа распределения остаточных напряжений в рельсах – диагностика выбросов рельсов в процессе эксплуатации из-за возникновения в рельсовых плетях усилий, которые вызваны температурным расширением рельса.

2. Остаточные напряжения в металлах

Сжимающие остаточные напряжения противостоят разрушительному действию растягивающих рабочих нагрузок, в то время как растягивающие остаточные напряжения, наоборот, усиливают их действие. Разрушение металлических деталей почти всегда начинается с образования трещин на поверхности или вблизи поверхности. Если при этом на поверхности присутствуют растягивающие напряжения, то они способствуют росту трещин, что приводит к ускоренному разрушению детали. Сжимающие напряжения, наоборот, препятствуют росту трещин, а также их образованию. Если же в металле помимо напряжений, возникающих вследствие рабочих нагрузок, присутствуют также так называемые остаточные напряжения, возникшие вследствие специальной обработки или предыдущей эксплуатации и остающиеся в отсутствие рабочих нагрузок, то эти напряжения суммируются. Поэтому для исследования пригодности и увеличения срока службы металлических изделий очень важно определять знак и величину остаточных напряжений в изделии.

Остаточные напряжения в металлах возникают и снимаются в той или иной степени вследствие действия различных

факторов. К таким факторам относятся в первую очередь действия рабочих нагрузок в процессе эксплуатации, сварка, различная обработка поверхности, действие химических веществ, температурная обработка.

В процессе эксплуатации детали она подвергается действию различных нагрузок, в результате которых в ней могут накапливаться остаточные напряжения, изменяя свойства детали. При медленном нагреве металла напряжения снимаются, поэтому термообработка приводит к минимальным остаточным напряжениям.

При сварке часть металла интенсивно нагревается, при этом резко снижается предел текучести, что приводит к необратимым пластическим деформациям и, как следствие, к растягивающим и сжимающим остаточным напряжениям в сварном соединении [4]. Кроме того, часть металла плавится, а потом остывает и вновь затвердевает. При этом происходит тепловое расширение расплавленного металла. Остывая и затвердевая, металл сжимается, но затвердевшие слои уже не могут изменять форму так же легко, как расплавленные. Затвердевающий металл более жестко связан с окружающей нерасплавленной массой, которая противостоит его сжатию. Вследствие этого в зоне перепада также возникают растягивающие остаточные напряжения, что проиллюстрировано на рис. 1. Следует отметить, что кроме растягивающих остаточных напряжений в результате сварки возникают также и сжимающие напряжения, а также изменение структуры материала. Все эти изменения сильно неоднородны по объему материала и зависят от металла и технологии сварки.

Все методы измерения остаточных напряжений разделяются на две группы: разрушающие и неразрушающие.

Особую нишу среди неразрушающих методов занимают ультразвуковые методы. Они основаны на определении остаточных напряжений по измерению задержки распространения продольных или сдвиговых акустических волн, поскольку механические напряжения приводят к изменению скорости звука в среде. Среди преимуществ ультразвука можно выделить относительную простоту в реализации измерений, дешевизну и ком-

пактность измерительной аппаратуры, а также универсальность подхода для всех материалов.

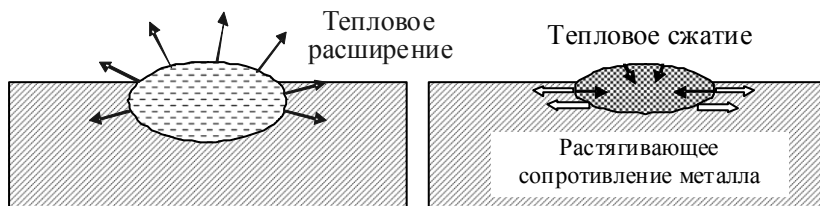


Рис. 1. Образование напряжений при сварке. Расширение и плавление металла при нагреве, затвердевание и сжатие при остывании

Одна из основных сложностей этого метода заключается в том, что относительное изменение скорости звука, даже при напряжениях на пороге текучести, невелико и как правило не превышает нескольких процентов. При типичных напряжениях порядка 100 МПа относительное изменение скоростей упругих волн лежит в диапазоне 10^{-3} – 10^{-4} . Поэтому требуется высокая точность измерения скорости звука [3], которую нужно измерять достаточно локально. Такой прецизионной точности можно достичь с использованием коротких акустических импульсов, получаемых средствами лазерной оптоакустики [2].

Вопрос количественной оценки остаточных напряжений по изменению скорости звука также является очень важным для данного метода и не всегда очевидно разрешим.

3. Теоретические основы ультразвукового метода измерения напряжений в металлах

Ультразвуковые методы измерения остаточных и рабочих напряжений в металлах основаны на так называемом акустоупругом эффекте [1]. Рассмотрим упругое твердое тело. Закон Гука в линейной среде, связывающий деформации и возникающие в теле напряжения, записывается в следующем виде:

$$(1) \quad \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl},$$

где ε_{kl} – тензор деформации; σ_{ij} – тензор возникающих напряжений; C_{ijkl} – тензор упругих модулей, который определяется свойствами самой среды.

Сила, действующая на единичный объем тела, испытывающий внутреннее напряжение σ_{ij} , равна $f_i = \partial\sigma_{ij}/\partial x_j$. Без учета внешних сил типа силы тяжести ускорение $\partial^2 u_j / \partial t^2$ вдоль оси \bar{x}_i , сообщаемое этой силой массе ρ единичного объема, равно

$$(2) \quad \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}.$$

Здесь вектор \vec{u} означает смещение частицы среды. Используя закон Гука (1), получим уравнение движения в виде:

$$(3) \quad \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_l}{\partial x_j \partial x_k}.$$

Будем искать решение этого уравнения в виде плоской волны, распространяющейся в направлении, определяемом единичным вектором $\vec{k}(p_1, p_2, p_3)$:

$$(4) \quad u_i = d_i F\left(t - \frac{(\vec{n}\vec{x})}{V}\right),$$

где V и \vec{d} – соответственно фазовая скорость и вектор поляризации плоской волны, распространяющейся в направлении \vec{k} . Тогда получим:

$$(5) \quad \rho V^2 d_i = C_{ijkl} p_j p_k d_l.$$

Вводя тензор второго ранга $\Gamma_{il} = C_{ijkl} p_j p_k$, запишем уравнение (5) в виде

$$(6) \quad \Gamma_{il} d_l = \rho V^2 d_i.$$

Уравнение (6) называется уравнением Кристоффеля и показывает, что вектор поляризации \vec{d} является собственным вектором тензора Γ_{il} с собственным значением $\xi = \rho V^2$.

Таким образом, для определения скорости и поляризации плоских волн, распространяющихся вдоль направления $\vec{k}(p_1, p_2, p_3)$ в анизотропной среде с матрицей жесткости C_{ijkl} , нужно найти собственные вектора и собственные значения

тензора $\Gamma_{il} = C_{ijkl}p_j p_k$. Следовательно, в общем случае для данного направления существуют три скорости, являющиеся корнями характеристического уравнения:

$$(7) \quad \left| \Gamma_{il} - \rho V^2 \delta_{il} \right| = 0.$$

Так как матрица жесткости C_{ijkl} является симметричной, то тензор Γ_{il} также будет симметричным, и его собственные значения будут действительными величинами, а собственные вектора – ортогональными. Поэтому в анизотропной среде вдоль направления $\vec{k}(p_1, p_2, p_3)$ могут распространяться три плоские волны с различными скоростями и ортогональными поляризациями.

Если же в среде имеются какие-либо начальные напряжения σ_{ij} , то при написании уравнения движения необходимо учитывать присутствие в среде ненулевого начального смещения, наведенного деформацией. Поэтому уравнения следует записывать в лагранжевых координатах $\{X_i\}$ деформированного твердого тела. Если считать амплитуды распространяющихся волн малыми, то обобщенное уравнение Кристоффеля в этом случае обычно записывают в виде

$$(8) \quad \left[\bar{C}_{ijkl} p_i p_l + (\sigma_{il} p_i p_l - \rho V^2) \delta_{jk} \right] d_k = 0,$$

где

$$(9) \quad \bar{C}_{ijkl} = \frac{\rho}{\rho_0} \left(C_{mnpq} + C_{mnpqrs} E_{rs} \right) \frac{\partial X_i}{\partial x_m} \frac{\partial X_j}{\partial x_n} \frac{\partial X_k}{\partial x_p} \frac{\partial X_l}{\partial x_q},$$

где X_i – лагранжевы координаты точек тела, подверженного статической деформации; x_i – координаты точек недеформированного тела плотностью ρ_0 .

В общем случае найти аналитическое решение задачи (8) не представляется возможным, однако если среда является изотропной в выделенных направлениях, в которых приложены напряжения и в которых распространяются акустические волны, то аналитическое решение существует. В частности, для продольной волны, распространяющейся в направлении X_l , собственное значение уравнения Кристоффеля выглядит следующим образом:

$$(10) \quad \rho V_{lx_1}^2 = (\lambda + 2\mu) + A\sigma_{11} + B(\sigma_{22} + \sigma_{33}).$$

Напряжения σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} ориентированы в направлениях X_1 , X_2 , X_3 соответственно. Коэффициенты A и B определяются упругими свойствами среды. Коэффициенты Ламэ λ , μ определяют собственное значение уравнения Кристоффеля для продольной волны в отсутствие напряжений:

$$(11) \quad \rho V_{l_0}^2 = (\lambda + 2\mu).$$

Так как относительное изменение скорости акустических волн, обусловленное наличием в среде напряжений, мало, то можно записать следующее приближенное равенство:

$$(12) \quad \frac{\rho V_{lx_1}^2 - \rho V_{l_0}^2}{\rho V_{l_0}^2} = \frac{(V_{lx_1} - V_{l_0})(V_{lx_1} + V_{l_0})}{V_{l_0}^2} \approx \frac{2(V_{lx_1} - V_{l_0})}{V_{l_0}}.$$

Таким образом, из (10), (11) и (12) следует, что если в среде присутствуют только напряжения σ_{11} или σ_{22} и σ_{33} , то между этими напряжениями и относительным изменением скорости продольных волн вдоль направления X_1 существует линейная зависимость:

$$(13) \quad \begin{cases} \sigma_{11}(x_1) = A_1 \times \frac{V_{lx_1} - V_{l_0}}{V_{l_0}}, \\ \sigma_{22}(x_1) + \sigma_{33}(x_1) = B_1 \times \frac{V_{lx_1} - V_{l_0}}{V_{l_0}}. \end{cases}$$

На основании этих соотношений изменение скорости продольных волн можно использовать для определения остаточных напряжений в среде.

Для поперечных волн можно получить аналогичные соотношения, которые показывают, что между напряжениями и относительным изменением скорости поперечных волн также существует линейная связь:

$$(14) \quad \begin{cases} \frac{V_{Sx_2} - V_{Sx_3}}{V_{S_0}} = D(\sigma_{22} - \sigma_{33}), \\ \frac{V_{Sx_2} + V_{Sx_3} - 2V_{S_0}}{2V_{S_0}} = G(\sigma_{22} + \sigma_{33}). \end{cases}$$

Здесь V_{Sx_2} и V_{Sx_3} – скорости поперечных волн, поляризованных соответственно в направлениях X_2 и X_3 , а константы D , G определяются упругими свойствами среды.

Именно соотношения (13) и (14) лежат в основе ультразвукового измерения напряжений в металлах.

4. Лазерно-ультразвуковой метод

Как уже упоминалось выше, из-за малости изменения скорости звука, использование ультразвукового метода затруднено необходимостью прецизионных измерений. Использование лазерного оптико-акустического возбуждения ультразвука в среде позволяет существенно повысить показатели ультразвукового метода измерения скорости звука, сохраняя идейную простоту, что позволяет применять его в широком круге задач и различных условиях эксперимента.

Акустические волны являются естественной реакцией среды на переменное внешнее воздействие. Одним из проявлений этого общего положения является оптико-акустический эффект – эффект возбуждения звука в среде, поглощающей переменный световой поток. При поглощении переменного светового потока поглощающая среда неоднородно нагревается, что приводит к появлению дополнительных механических напряжений, которые и являются источниками акустических волн. Это так называемый тепловой, наиболее общий механизм оптико-акустической генерации звука. Другие механизмы (стрикционный и концентрационно-деформационный) проявляются в металлах существенно меньше и здесь не рассматриваются. Стрикционный механизм играет заметную роль в случае однородной прозрачной среды на высоких ультразвуковых частотах, концентрационно-деформационный – в случае, если поглощенная световая энергия термализуется не сразу либо не полностью. При использовании лазеров видимого и инфракрасного диапазонов длин волн концентрационно-деформационный механизм может играть важную роль в полупроводниковых материалах [2].

Короткий лазерный импульс, поглощаясь на поверхности металла или материала специального преобразователя, генерирует короткий акустический видеоимпульс, использование которого позволяет проводить измерения с высоким временным разрешением.

Лазерно-ультразвуковое измерение остаточных напряжений, таким образом, основано на:

- зависимости скоростей ультразвуковых волн (продольных, сдвиговых, поверхностных) от остаточных напряжений в области измерений,
- прецизионном измерении скоростей ультразвуковых волн с высокой локальностью,
- пересчете измеренных значений скорости в величину остаточных напряжений и построении диаграммы их пространственного распределения.

Остановимся подробнее на генерации коротких акустических импульсов, необходимых для прецизионного измерения скорости ультразвука. Как уже указывалось выше, основной механизм генерации зондирующего импульса носит название теплового.

Уравнения для скалярного потенциала поля скоростей φ , описывающие тепловой механизм возбуждения ультразвука в вязкой теплопроводящей среде, можно записать в виде

$$(15) \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_0^2 \Delta \varphi - \frac{b}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \varphi = - \frac{c_0^2 \beta}{c_p} \frac{\partial}{\partial t} T_0 s',$$

$$\frac{\partial}{\partial t} T_0 s' = \chi \Delta (T_0 s') - \frac{\operatorname{div} \langle \vec{S} \rangle}{\rho_0}.$$

Колебательная скорость v связана с φ по формуле

$$(16) \quad v = \operatorname{grad} \varphi.$$

В (15) $s' = s - s_0$ – возмущение энтропии; c_p – теплоемкость при постоянном давлении; \vec{S} – вектор Умова–Пойтинга; ρ_0 и T_0 – равновесные плотность и температура; χ – температуропроводность; $c_0^2 = (\partial p / \partial \rho)_s$ – квадрат адиабатической скорости звука; $\beta = V^{-1} (\partial V / \partial T)_p$ – температурный коэффициент расширения

ния среды; $b = (\beta^* \sqrt{\chi})_{gl} / (\beta^* \sqrt{\chi})_{me}$ – параметр теплового взаимодействия, где $\beta^* = \beta(1 - 4c_t^2/3c_l^2)$; c_t и c_l – скорости сдвиговых и продольных волн соответственно. Индексы gl и me соответствуют прозрачной и поглощающей среде соответственно.

В случае свободной границы в качестве граничного условия добавляются условия обращения в ноль приращения давления, что соответствует $\varphi(z=0) = 0$, а в случае закрепленной границы – равенство нулю колебательной скорости $v(z=0) = \partial\varphi/\partial z(z=0) = 0$.

Решение (15) довольно громоздко и подробно изложено в [2]. Решение показывает, что спектр ОА-сигнала есть произведение спектра интенсивности лазерного излучения и передаточной функции $K(\omega)$, определяемой только характеристиками среды:

$$(17) \quad v(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\omega) \tilde{I}(\omega) e^{-i\omega t} d\omega.$$

В случае закрепленной границы

$$(18) \quad K_r(\omega) = \frac{\beta}{\rho_0 c_p} \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \omega^2 / c_0^2},$$

где α – коэффициент поглощения света, в предположении однородного бугеровского поглощения. В случае свободной границы

$$(19) \quad K_f(\omega) = \frac{\beta}{\rho_0 c_p} \frac{-i\alpha\omega / c_0}{\alpha^2 + \omega^2 / c_0^2}.$$

В случае импедансной границы передаточные функции представляют собой взвешенную сумму передаточных функций при свободной и закрепленной границах:

$$(20) \quad K = (K_r + NK_f) / (N + 1),$$

где $N = (\rho c_0)_{me} / (\rho c_0)_{gl}$ – импеданс границы.

В случае сильно поглощающей теплопроводящей среды, которой являются металлы, передаточная функция при закрепленной границе не зависит от частоты:

$$(21) K_r = \frac{\beta^*}{\rho_0 c_p} \frac{1+b}{1+R_T},$$

а при свободной акустической границе

$$(22) K_f = \frac{\beta^*}{\rho_0 c_p} \frac{1}{1+R_T} \left(\frac{-i\omega}{\omega_\chi} \right)^{1/2},$$

где $\omega_\chi = c_l^2/\chi$, а параметр $R_T = (\rho c_p \sqrt{\chi})_{gl} / (\rho c_p \sqrt{\chi})_{me}$ определяет отношение тепловых потоков в прозрачную и поглощающую среды.

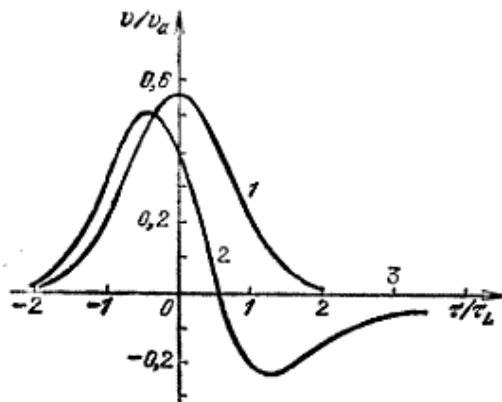


Рис. 2. Профили ОА сигнала в металле при закрепленной (1) и свободной (2) границах. Второй сигнал увеличен в $\sqrt{\omega_\chi \tau_L}$ раз (из [2])

На рис. 2 приведены формы ОА сигналов в металле при гауссовом профиле лазерного импульса $I(t) = I_0 f(t)$, $f(t) = \sqrt{\pi} \exp(-t^2 / \tau_L^2)$.

Таким образом, длительность генерируемого на поверхности металла акустического импульса определяется длительностью лазерного импульса и ограничивается снизу им же. То есть при использовании доступных наносекундных лазеров ближне-

го ИК диапазона можно генерировать акустические импульсы длительностью 5–10 нс.

Следует, однако, помнить, что акустический импульс подвержен затуханию и дифракции как в исследуемом металле, так и в акустическом тракте приемника, поэтому для успешного использования таких коротких импульсов требуются также широкополосные приемники и внимание к деталям схемы эксперимента, а также специальная обработка сигналов.

5. Измерение скорости звука в рельсах

5.1. ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА

Измерение скорости ультразвука в плоскопараллельных образцах производится так называемым времяпролетным методом. Этот метод заключается в том, чтобы с хорошей точностью измерить толщину образца и время распространения в нем короткого ультразвукового импульса.

Схема наклонного лазерно-ультразвукового преобразователя, которым производились измерения в работе, представлена на рис. 3. Сам преобразователь устанавливается на поверхность исследуемой конструкции (1). Он состоит из излучателя (2) и приёмника (3). Возбуждение продольных ультразвуковых волн производится в тонком слое генератора (4), который наклонён относительно объекта исследования. Лазерный импульс длительностью по поперечному сечению 8 нс поглощается в нём по закону Бугера. Неравномерный нагрев приводит к образованию широкополосного ультразвукового импульса, форма которого является сверткой формы лазерного импульса (близкой к гауссовой) и профиля распределения тепловых источников по глубине (бугеровская экспонента). Акустические волны достигают поверхности образца (1) через звукопроводящую призму. На границе «преобразователь–образец» происходит прохождение волны в образец. Помимо этого, на ней происходит конверсия продольной волны в сдвиговую и Рэлеевскую. Прозвучивая образец, они

попадают в приёмник (3) и регистрируются широкополосной пьезоэлектрической плёнкой (5).

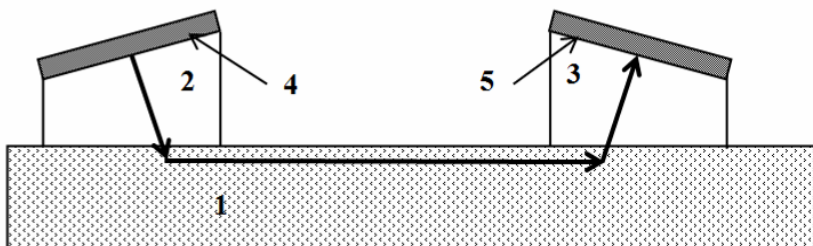


Рис. 3. Схема излучения и приёма в наклонном лазерно-ультразвуковом преобразователе.
1 – образец; 2 – излучатель; 3 – приёмник

Продольная скорость звука в образце может быть вычислена по формуле

$$(23) \quad c = \frac{h}{\tau - \tau_2 - \tau_3},$$

где τ – временная задержка между приходом продольной подповерхностной волны и моментом излучения лазера; τ_2 , τ_3 – время пробега акустических волн в звукопроводе источника и приёмника соответственно; h – длина измерительной базы, т.е. расстояние между источником и приёмником; c – скорость звука в образце.

База и времена распространения акустических волн в звукопроводах являются характеристиками преобразователя и определяются с помощью калибровочных образцов. Поэтому единственная измеряемая на образце величина – момент регистрации продольной подповерхностной волны.

На рис. 4 изображена временная форма принятого сигнала. Квадратом 1 выделена наводка на схему приёма, вызванная лазерным излучением. Спустя 5 мкс после неё приходит импульс, соответствующий продольной подповерхностной волне. Он имеет положительный пик, по максимуму которого опреде-

ляется временная задержка. Дальнейший отрицательный хвост объясняется его дифракцией в звукопроводе приёмника. Как можно видеть, импульс продольной подповерхностной волны хорошо выделяется по времени относительно остальных импульсов, что позволяет измерять скорость продольных волн в образце с высокой точностью.

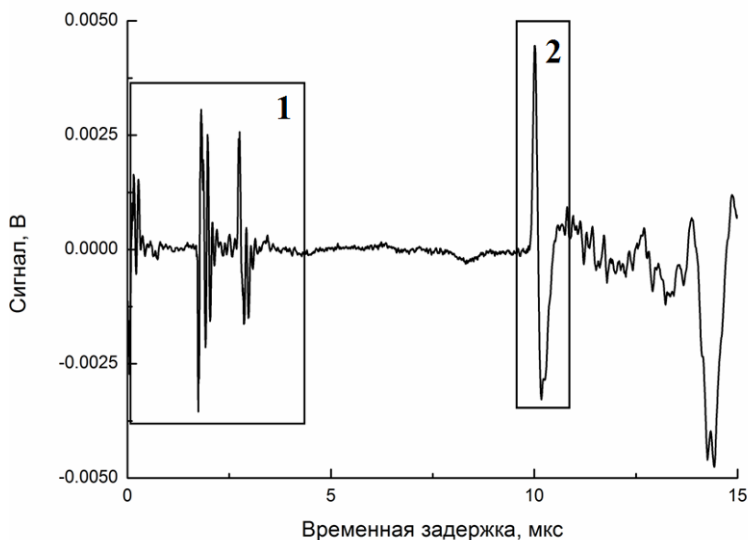


Рис. 4. Временная форма принятого сигнала.

1 — лазерная наводка; 2 — продольная подповерхностная волна

5.2. УСТАНОВКА

Фотография установки изображена на рис. 5. Основной её частью является оптоакустический блок (1). Он включает в себя лазер и синхронизированный с ним АЦП. Лазерный импульс от лазера доставляется в преобразователь по оптоволокну. Электрический сигнал, соответствующий принятому на пьезоприёмнике акустическому сигналу, оцифровывается в АЦП. Данные с АЦП поступают на компьютер, где происходит их дальнейшая обработка и отображение.

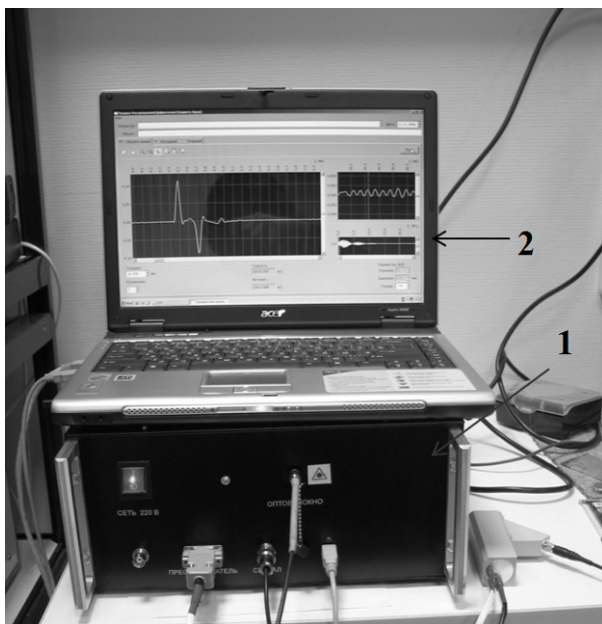


Рис. 5. Установка лазерно-ультразвукового дефектоскопа.
1 – оптоакустический блок; 2 – ноутбук.

5.3. ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Схема работы лазерно-ультразвукового преобразователя описана выше. Внешний вид преобразователя изображён на рис. 6. Сам преобразователь на нём обозначен номером 1. Оптическое волокно, по которому в преобразователь поступает лазерный импульс, обозначено на рисунке цифрой 2. Электрический сигнал от пьезоприёмника и провод питания обозначены цифрой 3. Крепление преобразователя к рельсу осуществляется жгутами (4). Для обеспечения акустического контакта между преобразователем и рельсом используется вода.

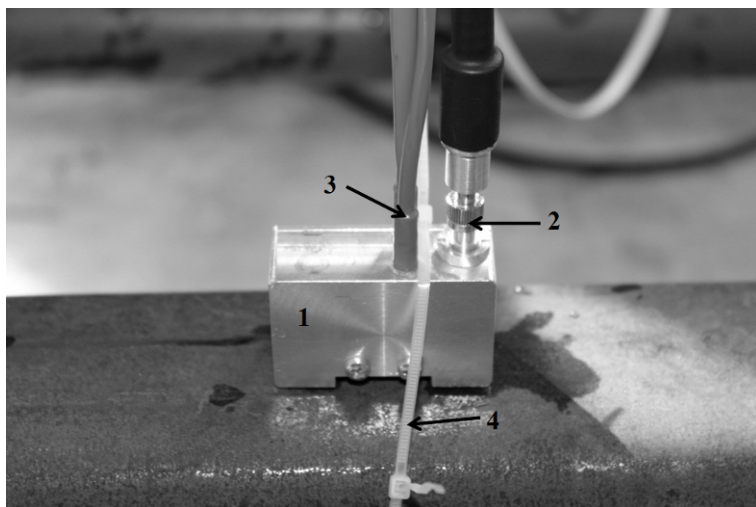


Рис. 6. Наклонный лазерно-ультразвуковой преобразователь, закреплённый на поверхности рельса.

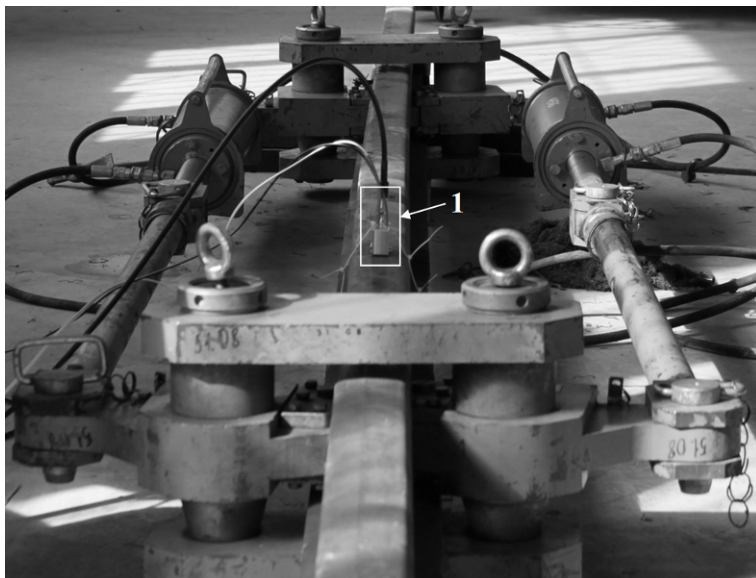
1 – преобразователь; 2 – ввод оптоволокну; 3 – сигнальный провод и провод питания; 4 – жгут, обеспечивающий прижим

5.4. СИСТЕМА СЖАТИЯ РЕЛЬСА

Для сжатия рельса использовался гидронатяжитель УНГ-75. Его фотография с зажатым рельсом приведена на рис. 7. Эта система позволяет имитировать сжимающие и растягивающие напряжения, возникающие в рельсе под температурным воздействием окружающей среды. Для данного типа рельсов изменение температуры на 1 градус приводит к появлению усилий в плетях. Цена деления на манометре составляет 20 атмосфер, поэтому за ошибку выставления давления бралось 10 атмосфер.

5.5. ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА

По описанной в п. 5.1 методике производились измерения скорости звука в зависимости от приложенных сжимающих и растягивающих усилий.



*Рис. 7. Рельс, зажатый в сжимающую систему.
1 – наклонный лазерно-ультразвуковой преобразователь*

Результаты измерений при сжатии приведены на рис. 8. Сжатие производилось от 20 до 240 атмосфер, что соответствует внутренним напряжениям от 5,7 МПа до 70 МПа. С учётом того что изменение температуры на 1° в рельсах приводит к возникновению напряжений близких к 2,5 МПа, данное сжатие эквивалентно охлаждению рельса на $25,5^\circ$. В пределах ошибки измеренные точки аппроксимируются прямой и, как и следует из теории, скорость продольных волн при сжатии растёт. Точность измерения вариации скорости звука составляет 0,05%, т.е. 3 м/с для стали. Наклон прямой на рис. 8 равен 0,124 м/(с МПа) следовательно, порог детектирования напряжения составляет 24,2 МПа, т.е. охлаждение на 10° .

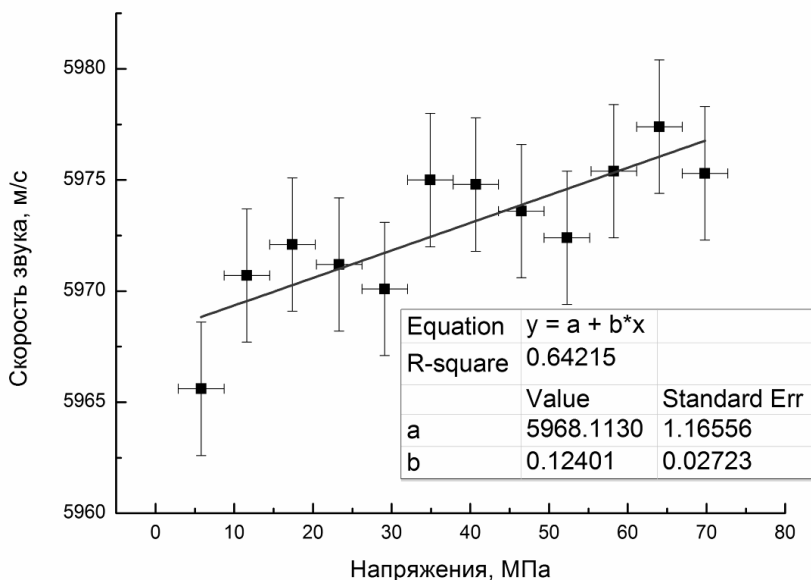


Рис. 8. Результаты измерения скорости звука в рельсе в зависимости от сжимающих усилий

На рис. 9 представлены аналогичные результаты для случая растяжения рельса. Оно производилось в пределах от 0 до 180 атмосфер, соответствующих внутренним напряжениям от 0 МПа до 58 МПа. В этом случае моделировался нагрев рельса на $23,2^\circ$. Как и следует из теории, скорость звука при расширении рельса имеет тенденцию к уменьшению. Как можно видеть, коэффициенты наклона аппроксимирующих прямых на рис. 8 и 9 близки по модулю. Порог детектирования при расширении составил 22,7 МПа, что соответствует нагреву на 9° .

6. Выводы

Разработан новый лазерно-ультразвуковой метод определения величины остаточных напряжений рельсовых плетей. Проведенный теоретический анализ подтвердил возможность лазерного возбуждения подповерхностной ультразвуковой волны в

рельсе. На его основе был создан лазерно-ультразвуковой преобразователь, осуществляющий возбуждение и регистрацию подповерхностных ультразвуковых волн.

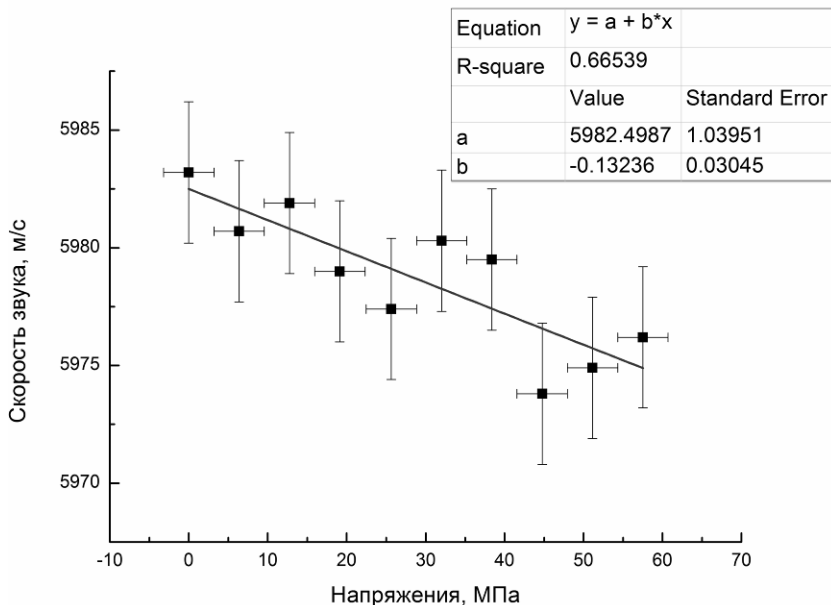


Рис. 9. Результаты измерения скорости звука в рельсе в зависимости от растягивающих усилий

На основе проведенного теоретического анализа связи скорости распространения ультразвуковых волн и величины остаточных напряжений был предложен и экспериментально реализован способ абсолютной калибровки метода, основанный на создании напряжений в образце гидрорастяжителем УНГ-75.

Высокая точность (0,05%) измерения вариации скорости продольных акустических волн в рельсах лазерно-ультразвуковым методом позволяет определить внутренние механические напряжения с порогом детектирования 22,7 МПа.

Литература

1. ГУЗЬ А.Н., МАХОРТ Ф.Г., ГУЦА О.И. *Введение в акустоупругость*. – К.: Наукова думка, 1977. – 151 с.
2. ГУСЕВ В.Э., КАРАБУТОВ А.А. *Лазерная оптоакустика*. – М.: Наука, 1991. – 304 с.
3. 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* // Акустический журнал. – 2007. – Т. 53, №4. – С. 1–8.
4. МАЛЫШЕВ Б.Д., МЕЛЬНИК В.И., ГЕТИЯ И.Г. *Ручная дуговая сварка*. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.

LASER-ULTRASOUND EVALUATION OF LONGITUDINAL STRESS IN RAILS

Alexander Karabutov, International Laser Center of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Doctor of Science, professor (aak@ilc.edu.ru).

Alexey Zharinov, International Laser Center of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, researcher (zharinov.alexey@gmail.com).

Alexander Ivochkin, International Laser Center of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Cand. of Science, senior researcher (ivochkin@yandex.ru).

Alexander Kaptil'ni, International Laser Center of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Cand. of Science, senior researcher (drc@pochta.ru).

Alexander Karabutov (jr.), International Laser Center of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, postgraduate student (akarabutov@gmail.com).

Dmitri Ksenofontov, International Laser Center of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, postgraduate student (ksenofontov@physics.msu.ru).

Igor Kudinov, International Laser Center of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, engineer (igor@optoacoustics.ru).

Varvara Simonova, International Laser Center of M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Cand. of Science, senior researcher (varvara.simonova@gmail.com).

Viktor Mal'tsev, Infrastructure diagnostics and monitoring center, Russian Railways, Moscow, head of the department (victor.malts@mail.ru).

Abstract: New laser-ultrasonic method for evaluation of residual stress in rails was developed. It is based on laser generation of sub-surface ultrasonic wave and its registration with piezoelectric transducer. The values of residual stress in rails are determined by measuring the velocity of the ultrasonic pulse. The laser-ultrasonic transducer which induces and registers sub-surface ultrasonic waves was constructed. We theoretically analyzed relation between ultrasound wave propagation velocity and the value of residual stress, and used these results to suggest and implement experimentally the method of absolute calibration based on formation of stress in a sample with the hydrotension device UNG-75.

Calibration allowed us to justify the linear dependency between relative velocity change (in the range of percent deciles) and applied tension/compression stress in the range of reversible deformations.

Keywords: laser-ultrasound evaluation, acoustoelastic effect, residual stress.