УДК 620.179.1

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ АКУСТОУПРУГОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© 2021 г. А.А. Хлыбов[1,*], А.Л. Углов[1], Д.А. Рябов[1]

[1]Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Россия 603155 Нижний Новгород, ул. Минина, 24
[*]E-mail: hlybov_52@mail.ru

Поступила в редакцию 15.10.2020; после доработки 30.10.2020
Принята к публикации 06.11.2020

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания методик определения напряженно-деформированного состояния акустически анизотропных конструкционных материалов в составе технических объектов, эксплуатируемых в арктических условиях. Проанализированы особенности использования явления акустоупругости для материалов с различными значениями акустоупругих коэффициентов, акустической анизотропии и коэффициентами температурной зависимости акустических параметров, фигурирующих в расчетных алгоритмах. Установлено, что существующие подходы к учету температурных эффектов в ряде важных случаев приводят к заметным погрешностям при определении механических напряжений в материале ответственных технических объектов. При этом учет температурных поправок необходим как для двухосного (плоского), так и для одноосного напряженного состояния. Экспериментально показано наличие анизотропии термоакустических коэффициентов поперечных волн для материалов, обладающих анизотропией. Предложены уточненные расчетные формулы для определения одно- и двухосного напряженного состояния анизотропного материала, учитывающие анизотропию термоакустических коэффициентов поперечных волн.

Ключевые слова: напряженное состояние, поперечные волны, упругая анизотропия, акустоупругие коэффициенты, термоакустические коэффициенты, задержки импульсов.

DOI: 10.31857/S0130308221010036

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время явление акустоупругости [1—4] широко используется для определения механических напряжений, возникающих в материале ответственных технических объектов в различных отраслях промышленности и транспорта.

Методы контроля напряженного состояния с успехом применяются в ядерной энергетике [5—7], строительстве [8], на железнодорожном [9—12] и трубопроводном [13—18] транспорте.

Существует значительное количество работ, посвященных созданию исследовательских и инженерных методик определения остаточных микро- и макронапряжений различных конструкционных материалах на базе явления акустоупругости [19—23].

Напряженное состояние, близкое к плоскому, реализуется в стенках газопроводов, эксплуатация которых в условиях Крайнего Севера сопряжена с резкими температурными колебаниями, без корректного учета которых оценка напряжений может привести к значительным погрешностям.

К числу ответственных объектов, в элементах которых реализуется одноосное напряженное состояние, следует отнести строительные несущие и другие конструкции, широко используемые в арктических условиях. Разработанные к настоящему времени инженерные методики использования явления акустоупругости не предполагают учета температурного фактора при контроле одноосного напряженного состояния с использованием поперечных волн, что, как показывают физические соображения и результаты экспериментов, может привести к заметным погрешностям в случае анизотропных материалов.

Сложившиеся к настоящему времени подходы к контролю механических напряжений в материале акустическим методом обычно базируются на общих соотношениях акустоупругости [4].

Соответствующие уравнения связи скорости и времени распространения упругих объемных волн различной поляризации с действующими напряжениями в рамках матричной теории акустоупругости в отсутствие начальных напряжений и внешних электромагнитных воздействий имеют обычный для линеаризованных соотношений вид:

$$\delta V_{ik} = \beta_{ikln}\sigma_{ln} + \gamma_{ik}^{V}\Delta T; \qquad (1)$$

$$\delta t_{ik} = \alpha_{ikln}\sigma_{ln} + \gamma^{t}_{ik}\Delta T, \tag{2}$$

где индекс i соответствует направлению распространения упругой волны, k — направлению поляризации; значения $i = k$ соответствуют продольным волнам, значения $i \neq k$ — поперечным; σ_{ln} — тензор напряжений в момент измерения; δV_{ik}, δt_{ik} — относительные изменения скорости и времени распространения упругих волн: $\delta V_{ik} = \dfrac{V_{ik} - V^0_{ik}}{V^0_{ik}}$, $\delta t_{ik} = \dfrac{t_{ik} - t^0_{ik}}{t^0_{ik}}$, V_{ik} и t_{ik} соответствуют напряжениям σ_{ln}, V^0_{ik} и t^0_{ik} — начальному ненапряженному состоянию материала; β_{ikln} — акустоупругие коэффициенты скорости; α_{ikln} — акустоупругие коэффициенты времени; $\Delta T = T - T_0$ — изменение температуры материала объекта при изменении напряжений от 0 до σ_{ln}; $\gamma^{V}_{ik} = \left(\dfrac{\partial \delta V_{ik}}{\partial T}\right)_{\sigma_{ln}}$ — термоакустиеские коэффициенты скорости; $\gamma^{t}_{ik} = \left(\dfrac{\partial \delta t_{ik}}{\partial T}\right)_{\sigma_{ln}}$ — термоакустические коэффициенты времени.

Методики контроля напряжений с использованием наиболее распространенного акустического эхо-импульсного метода обычно базируются на измерениях временных интервалов между многократно отраженными импульсами упругих волн различной поляризации. В этой связи акустоупругие соотношения типа (2) представляются более предпочтительными. Однако, если уравнения (1) непосредственно вытекают из соотношений нелинейной теории упругости и акустоупругие коэффициенты β_{ikln} не зависят (точнее – слабо зависят) от напряжений, то в уравнениях (2) относительно коэффициентов такого однозначного заключения сделать нельзя. Действительно, в случае изотропной среды связь между коэффициентами α_{ikln} и β_{ikln} имеет вид [4]:

$$\alpha_{ikln} = A_{ikln} - \beta_{ikln}, \tag{3}$$

где

$$A_{ikln} = -\frac{1}{E}\begin{bmatrix} \nu & \nu & \nu \\ \nu & \nu & \nu \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

E, ν — модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответственно, зависимость которых от напряжений вносит дополнительную ошибку в определение напряжений с использованием уравнений (2).

В случае анизотропного материала выражение (4) существенно усложняется и дополнительная методическая ошибка определения напряжений с помощью уравнений (2) становится еще большей и менее определенной.

На наш взгляд, более строгий подход к построению инженерных соотношений акустоупругости, базирующихся на измерении временных интервалов, предложен в работе [3], в которой на основе базовых уравнений (1) для случая плоского напряженного состояния с главными напряжениями σ_1, σ_2 в плоскости, перпендикулярной направлению распространения упругих волн, получены выражения, связывающие напряжения с задержками импульсов упругих волн двух типов: продольных, и поперечных, поляризованных вдоль главных напряжений.

Цель работы — уточнение алгоритма определения одно- и двухосного напряженного состояния анизотропного материала акустическим методом с учетом температурного фактора термоакустических коэффициентов поперечных волн.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Используем аналогичный подход при построении расчетных соотношений для анизотропного материала без упрощающих предположений в отношении акустоупругих коэффициентов, сделанных автором [3].

Будем рассматривать один из наиболее распространенных в технике вид конструкционных материалов — ортотропный, в котором действуют главные напряжения — продольное σ_1 и поперечное σ_2, лежащие в плоскости $z = 0$ и направленные вдоль осей x и y, совпадающими с осями анизотропии.

Уравнения акустоупругости (1) с учетом изменения температуры материала объекта контроля могут быть записаны следующим образом:

$$\delta V_{31} = \beta_{3111}\sigma_1 + \beta_{3122}\sigma_2 + \gamma^{V}_{31}\Delta T; \tag{5}$$

$$\delta V_{32} = \beta_{3211}\sigma_1 + \beta_{3222}\sigma_2 + \gamma_{32}^V \Delta T; \quad (6)$$

$$\delta V_{33} = \beta_{3311}\sigma_1 + \beta_{3322}\sigma_2 + \gamma_{33}^V \Delta T. \quad (7)$$

Введем упрощенные обозначения:

$V_1 = V_{31}$ — скорость упругой поперечной волны, распространяющейся нормально к поверхности объекта контроля и поляризованной вдоль оси x;

$V_2 = V_{32}$ — скорость упругой поперечной волны, распространяющейся нормально к поверхности объекта контроля и поляризованной перпендикулярно оси y;

$V_3 = V_{33}$ — скорость продольной волны, распространяющейся нормально к поверхности объекта контроля.

Акустоупругие и термоакустические коэффициенты обозначим следующим образом:

$$\beta_1 = \beta_{3111},\ \beta_2 = \beta_{3122},\ \beta_3 = \beta_{3211},\ \beta_4 = \beta_{3222},$$
$$\gamma_1^V = \gamma_{31}^V, \gamma_2^V = \gamma_{32}^V, \gamma_3^V = \gamma_{33}^V.$$

Из симметрии задачи следует равенство двух коэффициентов $\beta_{3311} = \beta_{3322}$, которые обозначим через β_5.

Таким образом, исходные уравнения акустоупругости приобретают вид:

$$\delta V_1 = \beta_1\sigma_1 + \beta_2\sigma_2 + \gamma_1^V \Delta T; \quad (8)$$

$$\delta V_2 = \beta_3\sigma_1 + \beta_4\sigma_2 + \gamma_2^V \Delta T; \quad (9)$$

$$\delta V_3 = \beta_5(\sigma_1 + \sigma_2) + \gamma_3^V \Delta T. \quad (10)$$

Обозначим времена распространения упругих волн в напряженном состоянии через t_1, t_2, t_3, а в ненапряженном состоянии через t_{01}, t_{02}, t_{03}.

Элементарные преобразования позволяют исключить неизвестные величины толщины материала в зоне измерений до и после приложения напряжений и, отбросив добавки второго порядка малости, записать уравнения акустоупругости в следующем виде:

$$\delta d_1 = \alpha_1\sigma_1 + \alpha_2\sigma_2 + \left(\gamma_3^V - \gamma_1^V\right)\Delta T; \quad (11)$$

$$\delta d_2 = \alpha_3\sigma_1 + \alpha_4\sigma_2 + \left(\gamma_3^V - \gamma_2^V\right)\Delta T, \quad (12)$$

где $\delta d_1 = \dfrac{d_1 - d_{01}}{d_{01}}$, $d_1 = \dfrac{t_1}{t_3}$, $d_{01} = \dfrac{t_{01}}{t_{03}}$; $\delta d_2 = \dfrac{d_2 - d_{02}}{d_{02}}$, $d_2 = \dfrac{t_2}{t_3}$, $d_{02} = \dfrac{t_{02}}{t_{03}}$, α_1, α_2, α_3, α_4 — акустоупругие коэффициенты времени, связанные с акустоупругими коэффициентами скорости:

$$\alpha_1 = \beta_5 - \beta_1,\ \alpha_2 = \beta_5 - \beta_2,\ \alpha_3 = \beta_5 - \beta_3,\ \alpha_4 = \beta_5 - \beta_4. \quad (13)$$

Из уравнений (11), (12) следуют расчетные соотношения для определения плоского напряженного состояния:

$$\sigma_1 = k_1\left[\delta d_1 - \left(\gamma_3^V - \gamma_1^V\right)\Delta T\right] + k_2\left[\delta d_2 - \left(\gamma_3^V - \gamma_2^V\right)\Delta T\right]; \quad (14)$$

$$\sigma_2 = k_3\left[\delta d_1 - \left(\gamma_3^V - \gamma_1^V\right)\Delta T\right] + k_4\left[\delta d_2 - \left(\gamma_3^V - \gamma_2^V\right)\Delta T\right], \quad (15)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 — тензометрические [3] или упругоакустические [4] коэффициенты:

$$k_1 = \frac{\alpha_4}{\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3},\ k_2 = -\frac{\alpha_2}{\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3},\ k_3 = -\frac{\alpha_3}{\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3},\ k_4 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1\alpha_4 - \alpha_2\alpha_3}. \quad (16)$$

Очевидно, что экспериментально определить термоакустические коэффициенты времени $\gamma_{1,2,3}^t$ проще, чем термоакустические коэффициенты скорости $\gamma_{1,2,3}^V$.

В [4] установлена связь между этими коэффициентами:

$$\gamma_{1,2}^{V} = -\gamma_{1,2}^{t},\ \gamma_{3}^{V} = \frac{\alpha}{3} - \gamma_{3}^{t}, \tag{17}$$

где α — коэффициент объемного теплового расширения материала объекта.

С учетом (17) расчетные формулы (23), (24) принимают вид:

$$\sigma_1 = k_1\left[\delta d_1 - \left(\frac{\alpha}{3} + \gamma_1^t - \gamma_3^t\right)\Delta T\right] + k_2\left[\delta d_2 - \left(\frac{\alpha}{3} + \gamma_2^t - \gamma_3^t\right)\Delta T\right]; \tag{18}$$

$$\sigma_2 = k_3\left[\delta d_1 - \left(\frac{\alpha}{3} + \gamma_1^t - \gamma_3^t\right)\Delta T\right] + k_4\left[\delta d_2 - \left(\frac{\alpha}{3} + \gamma_2^t - \gamma_3^t\right)\Delta T\right]. \tag{19}$$

Обычно авторами инженерных методик акустоупругости в отношении термоакустических коэффициентов поперечных волн со взаимно перпендикулярными векторами поляризации делается предположении об их равенстве:

$$\gamma_1^t = \gamma_2^t. \tag{20}$$

То же самое регламентируется нормативными документами ГОСТ Р 52890—2007, ГОСТ Р 56664—2015.

Однако из физических представлений об особенностях распространения поперечных горизонтально поляризованных волн в акустически анизотропных материалах следует, что для них равенство (20) не выполняется. Действительно, как показано в [2], термоакустические коэффициенты связаны с акустоупругими коэффициентами пропорциональной зависимостью Акустоупругие коэффициенты, как следует из результатов современных исследований [14, 23—26], зависят от степени акустической анизотропии материала, при этом неучет факта зависимости акустоупругих коэффициентов от степени анизотропии может привести к существенным погрешностям при определении напряжений. То же может произойти и при допущении несправедливости равенства (20) в случае акустически анизотропных материалов.

Для оценки влияния температуры на результаты измерения двухосных напряжений, формулы (18), (19) удобно записать следующим образом:

$$\sigma_1 = \sigma_1\left(T_0\right) + \Delta\sigma_1\left(\Delta T\right); \tag{21}$$

$$\sigma_2 = \sigma_2\left(T_0\right) + \Delta\sigma_2\left(\Delta T\right), \tag{22}$$

где $\sigma_1(T_0)$, $\sigma_2(T_0)$ соответствуют напряжениям, возникающим в объекте при неизменной температуре T_0 и рассчитываемым по обычным формулам акустоупругости:

$$\sigma_1\left(T_0\right) = k_1\delta d_1 + k_2\delta d_2; \tag{23}$$

$$\sigma_2\left(T_0\right) = k_3\delta d_1 + k_4\delta d_2. \tag{24}$$

Температурные добавки к напряжениям можно записать следующим образом:

$$\Delta\sigma_1\left(\Delta T\right) = \Delta\sigma_1'\left(\Delta T\right) + \Delta\sigma_1''\left(\Delta T\right); \tag{25}$$

$$\Delta\sigma_2\left(\Delta T\right) = \Delta\sigma_2'\left(\Delta T\right) + \Delta\sigma_2''\left(\Delta T\right), \tag{26}$$

где добавки $\Delta\sigma_1'\left(\Delta T\right)$ и $\Delta\sigma_2'\left(\Delta T\right)$ зависят от разности термоакустических коэффициентов поперечных и продольных волн, как это указано в [1] (с поправкой на температурный коэффициент расширения):

$$\Delta\sigma_1'\left(\Delta T\right) = \left(k_1 + k_2\right)\left(\gamma_3^t - \overline{\gamma^t} - \frac{\alpha}{3}\right)\Delta T; \tag{27}$$

$$\Delta\sigma_2'\left(\Delta T\right) = \left(k_3 + k_4\right)\left(\gamma_3^t - \overline{\gamma^t} - \frac{\alpha}{3}\right)\Delta T, \tag{28}$$

где $\overline{\gamma^t}$ — среднее значение термоакустического коэффициента времени для поперечных волн $\overline{\gamma^t} = \frac{\gamma_1^t + \gamma_2^t}{2}$.

Добавки $\Delta\sigma_1''(\Delta T)$ и $\Delta\sigma_2''(\Delta T)$ возникают при невыполнении равенства (20):

$$\Delta\sigma_1''(\Delta T) = \frac{(k_1 - k_2)(\gamma_2^t - \gamma_1^t)}{2}\Delta T; \tag{29}$$

$$\Delta\sigma_2''(\Delta T) = \frac{(k_3 - k_4)(\gamma_2^t - \gamma_1^t)}{2}\Delta T. \tag{30}$$

Для проверки высказанных предположений проводился эксперимент по определению термоакустических коэффициентов γ_1^t и γ_2^t на образцах акустически изотропной стали 20 и трубной стали класса прочности Х70 толщиной 16 мм с разной степенью собственной акустической анизотропии $A_0 = \frac{t_{02}}{t_{01}} - 1$, приблизительно равными 3 и 7 %.

Измерения задержек импульсов проводились с помощью измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН» (№ в Государственном реестре средств измерений 67552-17), имеющего метрологически обеспеченное среднее квадратическое отклонение неисключенной систематической погрешности $\Delta t'$, равное 1 нс. Погрешность используемого контактного термометра составляла 0,1°С.

Измерения проводились с помощью прямого совмещенного преобразователя поперечных волн, имеющего в качестве активного элемента две рядом расположенные пьезопластинки с частотой 5 МГц со взаимно перпендикулярными векторами поляризации. Использовались два раздельных приемо-передающих канала ИВК «АСТРОН» для каждой пьезопластинки

На рис. 1 приведена осциллограмма импульсов, типичная для обоих каналов.

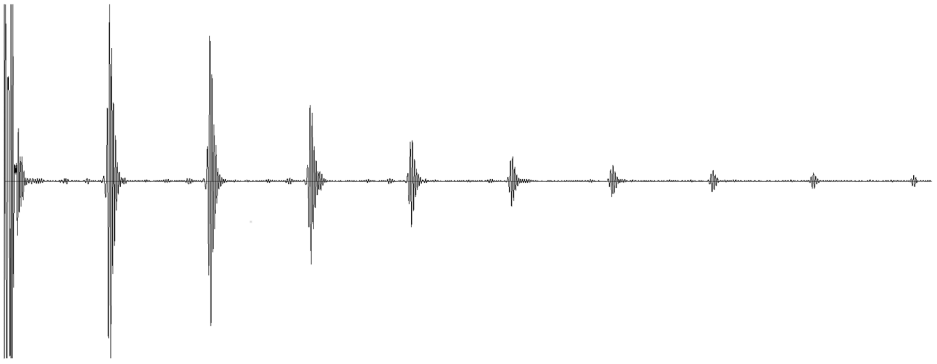

Рис. 1. Типичная осциллограмма отраженных импульсов поперечных волн.

Для исследованных образцов задержка между 1-м и 2-м отраженными импульсами составляет приблизительно 10 мкс. Поэтому применение ИВК «АСТРОН» обеспечивает величину относительной погрешности $\delta' t = \frac{\Delta t'}{\overline{t}}$ при измерении задержки между 1-м и n-м отраженными импульсами порядка $\frac{10^{-4}}{(n-1)}$. Нами использовались 1-й и 6-й отраженные импульсы, что обеспечивало относительную погрешность измерения временных интервалов 2×10^{-5}.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2—4 приведены графики зависимостей $\frac{\Delta t_1}{t_{01}}(T), \frac{\Delta t_2}{t_{02}}(T)$ для трех исследованных образцов.

Рис. 2 показывает, что для акустически изотропной стали разница термоакустических коэффициентов поперечных волн практически отсутствует, что и следовало ожидать.

Для анизотропной стали с величиной собственной анизотропии порядка 3 % термоакустические

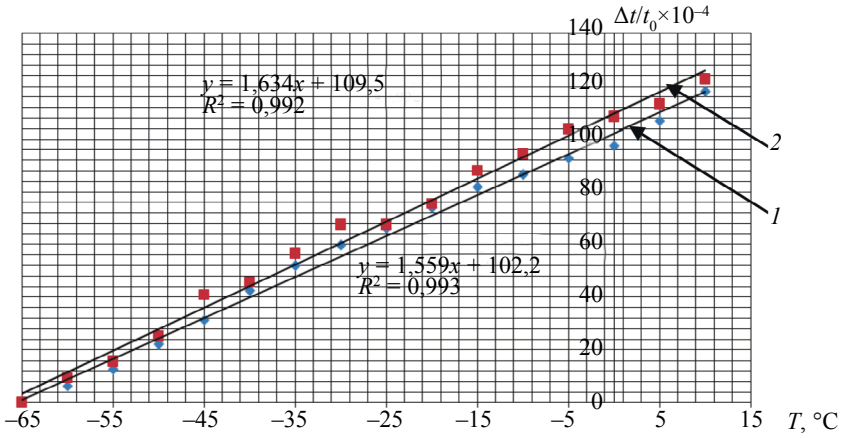

Рис. 2. Термоакустические кривые для образцов из акустически изотропной стали 20:
1 — $\frac{\Delta t_1}{t_{01}}(T)$; 2 — $\frac{\Delta t_2}{t_{02}}(T)$.

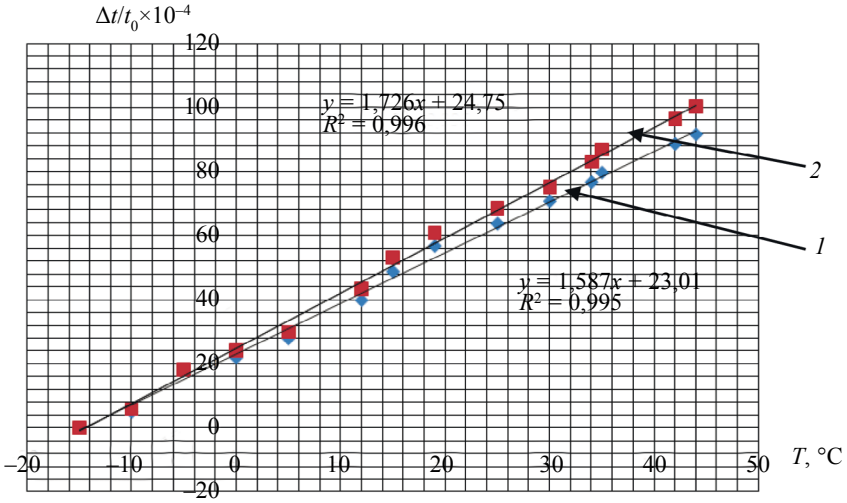

Рис. 3. Термоакустические кривые для образцов из анизотропной стали Х70 со степенью собственной анизотропии порядка 3%:
1 — $\frac{\Delta t_1}{t_{01}}(T)$; 2 — $\frac{\Delta t_2}{t_{02}}(T)$.

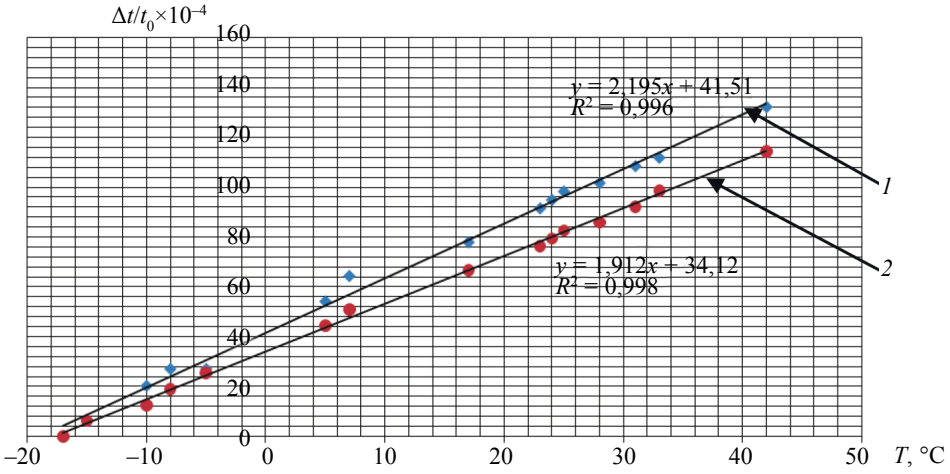

Рис. 4. Термоакустические кривые для образцов анизотропной стали Х70 со степенью собственной анизотропии порядка 7%:
1 — $\frac{\Delta t_1}{t_{01}}(T)$; 2 — $\frac{\Delta t_2}{t_{02}}(T)$.

коэффициенты составляют: $\gamma_1^t = 1{,}59 \times 10^{-4}$ град$^{-1}$, $\gamma_2^t = 1{,}73 \times 10^{-4}$ град$^{-1}$, для анизотропной стали с величиной $A_0 \approx 7$ %: $\gamma_1^t = 2{,}20 \times 10^{-4}$ град$^{-1}$, $\gamma_2^t = 1{,}91 \times 10^{-4}$ град$^{-1}$, т.е для нее разность термоакустичеких коэффициентов вдвое больше. При этом для первой стали $\gamma_1^t < \gamma_2^t$, а для второй — $\gamma_1^t > \gamma_2^t$.

Погрешность определения термоакустических коэффициентов можно оценить по приближенной формуле:

$$\Delta\gamma^t \approx \sqrt{2}\overline{\gamma^t}\sqrt{\left(\delta' t\right)^2 + \left(\delta' T\right)^2}, \tag{31}$$

где $\delta' t = \dfrac{\Delta t}{\overline{t}}$, Δt — абсолютная погрешность определения задержки, $\overline{t}$ — ее среднее значение; $\delta' T = \dfrac{\Delta' T}{T - T_0}$, $\Delta' T$ — абсолютная погрешность определения температуры в диапазоне T—T_0.

При доверительной вероятности 95 % погрешность определения термоакустических коэффициентов $0{,}01 \times 10^{-4}$ град$^{-1}$, поэтому разница термоакустических коэффициентов для исследованных анизотропных сталей представляется значимой.

Для оценки влияния анизотропии термоакустических коэффициентов на погрешность определения двухосного напряженного состояния, рассмотрим величины $\delta\sigma_1 = \dfrac{\Delta\sigma_1''(\Delta T)}{\Delta\sigma_1'(\Delta T)}$ и $\delta\sigma_2 = \dfrac{\Delta\sigma_2''(\Delta T)}{\Delta\sigma_2'(\Delta T)}$, характеризующие соотношение добавок к расчетным значениям напряжений с учетом и без учета анизотропии термоакустических коэффициентов. Из формул (27—30) следует:

$$\delta\sigma_1 = \frac{(k_1 - k_2)(\gamma_2^t - \gamma_1^t)}{2(k_1 + k_2)(\gamma_3^t - \overline{\gamma^t})}; \tag{32}$$

$$\delta\sigma_2 = \frac{(k_3 - k_4)(\gamma_2^t - \gamma_1^t)}{2(k_3 + k_4)(\gamma_3^t - \overline{\gamma^t} - \dfrac{\alpha}{3})}. \tag{33}$$

По данным [4], коэффициент объемного теплового расширения для исследуемых марок стали $\alpha \approx 3 \times 10^{-5}$ град$^{-1}$. В соответствии с результатами работы [28] примем $\gamma_3^t \approx 0{,}9 \times 10^{-4}$ град$^{-1}$.

В соответствии с экспериментальными результатами, приведенными в работе [15] для стали с начальной анизотропией, равной 3 %:

$k_1 = 9{,}8 \times 10^4$ МПа, $k_2 = -1{,}3 \times 10^4$ МПа, $k_3 = 13{,}9 \times 10^4$ МПа, $k_4 = -1{,}6 \times 10^4$ МПа,

для стали с начальной анизотропией, равной 7 %:

$k_1 = 6{,}0 \times 10^4$ МПа, $k_2 = -1{,}8 \times 10^4$ МПа, $k_3 = 11{,}6 \times 10^4$ МПа, $k_4 = -2{,}2 \times 10^4$ МПа.

Таким образом, для анизотропной стали с начальной анизотропией порядка 3 % получаем: $\delta\sigma_{1,2} \approx 10{,}0$ %; для анизотропной стали с начальной анизотропией порядка 7 %: $\delta\sigma_{1,2} \approx 20$ %, что уже довольно существенно и требует учета анизотропии термоакустических коэффициентов.

Например, при резких температурных перепадах, свойственных климату Арктики, расчет напряжений без учета анизотропии термоакустических коэффициентов может привести к заметным погрешностям, составляющих, как это следует из формул (29), (30), порядка 50 и 100 МПа для исследованных анизотропных сталей при перепаде температур .

В случае одноосного напряженного состояния достаточно двух измерений: для поперечных волн с взаимно перпендикулярной поляризацией.

Соответствующие строгие расчетные формулы приведены в работе [3] и в ГОСТ Р 56664—2015, однако для более наглядного представления влиянии анизотропии термоакустических коэффициентов на результаты расчета одноосного напряженного состояния рассмотрим упрощенную формулу, использование которой не приводит к значительным погрешностям по сравнению со строгими формулами:

$$\sigma = D(A - A_0), \tag{34}$$

где $A_0 = \dfrac{t_{02}}{t_{01}} - 1$ — собственная анизотропия материала в отсутствие напряжений; $A = \dfrac{t_2}{t_1} - 1$ — анизотропия материала при действии одноосных напряжений; D — тензометрический коэффициент, близкий для исследуемых сталей к величине $-1{,}1 \times 10^5$ МПа [3].

С учетом анизотропии термоакустических коэффициентов формула для анизотропии при температуре в отсутствие напряжений приобретает вид:

$$A(T) = A(T_0) + \Delta A(T), \tag{35}$$

где $\Delta A(T) = [A(T_0) + 1](\gamma_2^t - \gamma_2^t)\Delta T$.

Добавка к анизотропии ΔT приводит к систематической погрешности определения напряжений с учетом формулы (34), составляющей приблизительно 1,5 МПа/град для стали с анизотропией 3 % и 3 МПа/град для стали с анизотропией 3 %, что может привести к заметным погрешностям, составляющих порядка 75 и 150 МПа для исследованных сталей при перепаде температур ±50 °С.

Факт зависимости акустической анизотропии от температуры для исследованных образцов анизотропной стали подтверждается графиками, приведенными на рис. 5.

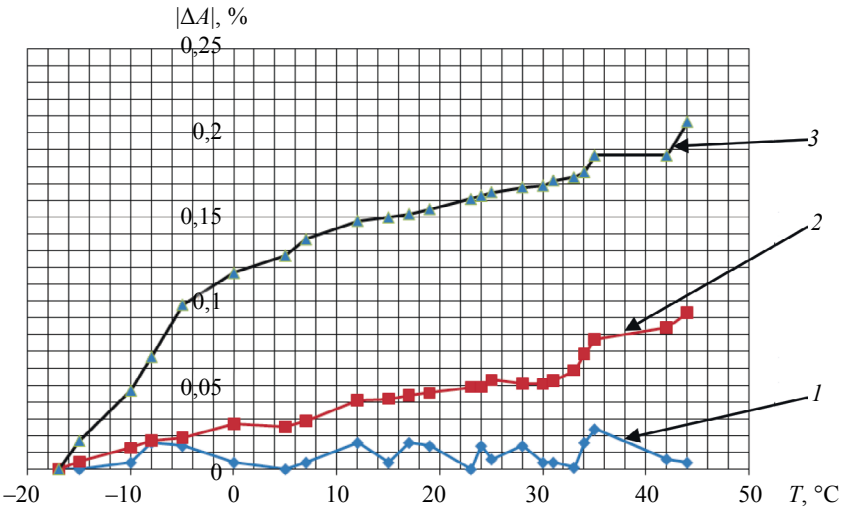

Рис. 5. Зависимость акустической анизотропии от температуры:
1 — $A_0 \approx 0$ %; *2* — $A_0 \approx 3$ %; *3* — $A_0 \approx 7$ %.

Погрешность определения анизотропии $\Delta A \approx \sqrt{2\delta t}$, где $\delta t = \dfrac{\Delta t}{\overline{t}}$; Δt — абсолютная погрешность определения задержки; $\overline{t}$ — ее среднее значение. При использовании ИВК «АСТРОН» и определении задержек между 1-м и 6-м отраженными импульсами величина ΔA не превышает 0,015 %.

Из полученных результатов следует, что при расчете одноосного напряженного состояния при значительных перепадах температур следует учитывать анизотропию термоакустических коэффициентов.

ВЫВОДЫ

1. На основании физических представлений о связи акустоупругих и термоакустических коэффициентов сделано предположение об анизотропии последних для поперечных горизонтально поляризованных волн, распространяющихся в анизотропном материале.

2. Результаты сравнительных экспериментальных исследований, проведенных на образцах из изотропной стали и анизотропной стали с разной степенью собственной акустической анизотропии, показали для последней наличие разницы термоакустических коэффициентов по-разному поляризованных поперечных волн, заведомо превышающей погрешность измерений. При этом эта разница увеличивается с увеличением степени анизотропии.

3. Оценена погрешность определения напряжений, вызванная неучетом анизотропии термоакустических коэффициентов поперечных волн. Показано, что для стали со значительной собственной анизотропией резкие перепады температур, свойственные условиям Арктики, могут привести к существенным ошибкам в расчете напряжений.

4. Предложены уточненные расчетные формулы для определения одно- и двухосного напряженного состояния анизотропного материала, учитывающие анизотропию термоакустических коэффициентов поперечных волн.

Исследование выполнено по гранту РНФ №19-19-00332 «Разработка научно-обоснованных подходов и аппаратно-программных средств мониторинга поврежденности конструкционных материалов на основе подходов искусственного интеллекта для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов в арктических условиях».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуща О.И.* Введение в акустоупругость. Киев: Наукова думка, 1977. 151 с.

2. *Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н.* Акустическая тензометрия. Кишинев: Штиинца, 1991. 204 с.

3. *Никитина Н.Е.* Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.

4. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 656 с.

5. *Трофимов А.И., Минин С.И., Трофимов М.А.* Измерение напряженного состояния сварных соединений технологического оборудования и циркуляционных трубопроводов АЭС на основе теории акустоупругости // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2016. № 2. С. 26—34.

6. *Минин С.И.* Определение модулей упругости третьего порядка для измерения напряженно-деформированного состояния металла элементов конструкций АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2018. № 1. С. 15—22.

7. *Хлыбов А.А., Рябов Д.А.* Оценка остаточных напряжений в образцах из ферритно-перлитной стали с аустенитной наплавкой // Металловедение и термическая обработка металлов. 2019. № 2 (764). С. 45—50.

8. *Алексеева Е.Л.,Альхиминко А.А., Беляев А.К., Лобачев А.М., Полянский В.А., Ростовых Г.Н., Третьяков Д.А., Штукин Л.В., Яковлев Ю.А.* Оценка напряженно-деформированного состояния и растрескивания атмосферостойкой конструкционной стали методом акустоупругости // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 12 (51). С. 33—44.

9. *Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В., Гущина Л.В.* Исследования структурного и напряженно-деформированного состояния рельсов текущего производства методом акустоупругости // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2018. Т. 21. № 2. С. 13—23.

10. *Степанова Л.Н., Бехер С.А., Курбатов А.Н., Тенитилов Е.С.* Исследование напряженного состояния рельса с использованием акустоупругости и тензометрии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 7 (655). С. 103—109.

11. *Муравьев В.В., Волкова Л.В., Платунов А.В., Булдакова И.В.* Оценка напряженно-деформированного состояния рельсов методами конечных элементов и акустоупругости // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 1. С. 41—44.

12. *Муравьев В.В., Волкова Л.В.* Экспериментальная оценка остаточных напряжений и натяга бандажей локомотивных колес методом акустоупругости // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 4. С. 98—104.

13. *Никитина Н.Е., Камышев А.В., Казачек С.В.* Использование явления акустоупругости при исследовании напряженного состояния технологических трубопроводов // Дефектоскопия. 2009. № 12. С. 52—59.

14. *Волкова Л.В., Муравьева О.В., Муравьев В.В., Булдакова И.В.* Прибор и методики измерения акустической анизотропии и остаточных напряжений металла магистральных газопроводов // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10. № 1. С. 42—52.

15. *Углов А.Л., Хлыбов А.А.* О контроле напряженного состояния газопроводов из анизотропной стали методом акустоупругости // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 34—41.

16. *Булдакова И.В., Волкова Л.В., Муравьев В.В.* Распределение напряжений в образцах труб магистральных газопроводов со сварным соединениями // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 1. С. 4—8. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-4-8

17. *Никитина Н.Е., Камышев А.В., Казачек С.В.* Применение метода акустоупругости для определения напряжений в анизотропных трубных сталях // Дефектоскопия. 2015. № 3. С. 51—60.

18. *Махутов Н.А., Пасманик Л.А., Камышев А.В.* Метод акустоупругости для оценки напряженно-деформированного состояния и безопасности элементов трубопроводных систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2018. № 1. С. 19—29.

19. *Углов А.Л., Хлыбов А.А., Бычков А.Л., Кувшинов М.О.* О неразрушающем контроле остаточных напряжений в деталях осесимметричной формы из стали 03н17к10в10мт // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 4. С. 3—9.

20. *Муравьев В.В., Стрижак В.А., Пряхин А.В.* Исследование внутренних напряжений в металлоконструкциях методом акустоупругости // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 12. С. 52—57.

21. *Zhan Y., Changsheng L., Xiangwei K., Zhongya L.* Experiment and numerical simulation for laser ultrasonic measurement of residual stress // Ultrasonics. 2017. V. 73. P. 271—276.

22. *Abbasi Z., Ozevin D.* The influence of ultrasonic frequency on shear 31. stress measurement using acoustoelasticity / Conference Proceedings. 42. Ser. "42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability of NDE". 2016. P. 7 —10.

23. *Albakri M.I., Tarazaga P.A.* A novel acoustoelastic-based technique for stress measurement in structural components // Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. 34th. Ser. “Dynamics of Civil Structures — Proceedings of the 34th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics, 2016”. 2016. P. 49—56.

24. *Grishchenko A.I., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Shtukin L.V.* Relationship between the acoustic anisotropy parameter and measures of the stress-strain state for a specimen with a stress concentrator // Days on Diffraction (DD). IEEE. 2017. P. 154—158.

25. *Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Yakovlev Y.A.* Investigation of the correlation between acoustic anisotropy, damage and measures of the stress-strain state // Procedia Structural Integrity. 2017. V. 6. P. 201—207.

26. *Никитина Н.Е., Казачек С.В.* Зависимость коэффициентов акустоупругости от анизотропии физико-механических свойств трубных сталей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 4. С. 49—54.

31. *Камышев А.В., Макаров С.В., Пасманик Л.А., Смирнов В.А., Модестов В.С., Пивков А.В.* Обобщенные коэффициенты для измерения механических напряжений методом акустоупругости в конструкциях из углеродистых и низколегированных сталей // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 3—10.

32. *Никитина Н.Е., Камышев А.В., Казачек С.В*. Учет температурного фактора при ультразвуковом контроле напряженного состояния трубопроводов // Дефектоскопия. 2012. № 5. С. 20—25.