УДК 620.179.16

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА И ПАРАМЕТРА АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ И НАКОПЛЕННОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ УСТАЛОСТНОМ РАЗРУШЕНИИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

© 2024 г. В.В. Мишакин[1,*], В.А. Клюшников[1], А.В. Гончар[1], О.А. Сергеева[2,]**

[1]ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», Россия 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
[2]ООО «Волга-Спецгидроэнергомонтаж» — «Камспецэнерго», Россия 423800 Набережные Челны, Шлюзовая ул., 8
E-mail: [*]ndt@ipmran.ru; [**]sergeevaoa_kse@mail.ru

Поступила в редакцию 26.06.2024; после доработки 26.06.2024
Принята к публикации 28.06.2024

Исследовалось влияние усталостного разрушения на упругие характеристики метастабильной аустенитной стали AISI 321: коэффициент Пуассона и параметр акустической анизотропии. Расчет упругих характеристик производился по данным ультразвуковых измерений времени распространения продольных и поперечных упругих волн. Объемная доля мартенсита деформации определялась вихретоковым методом. Теоретические исследования показали, что основными факторами, влияющими на коэффициент Пуассона, являются накопление микроповреждений и изменение фазового состава. Изменение параметра акустической анизотропии связано с влиянием циклического деформирования на кристаллографическую текстуру матрицы материала и образованием ориентированных кристаллов деформационного мартенсита. На основании анализа экспериментальных результатов получены выражения для расчета по данным акустических измерений поврежденности и относительной накопленной пластической деформации, широко используемых в инженерной практике для определения усталостного ресурса материалов конструкций.

Ключевые слова: аустенитная нержавеющая сталь, усталость, деформационное мартенситное превращение, ультразвуковой метод, параметр акустической анизотропии, коэффициент Пуассона, вихретоковый метод.

USING POISSON'S RATIO AND ACOUSTIC ANISOTROPY PARAMETER TO ASSESS DAMAGE AND ACCUMULATED PLASTIC STRAIN DURING FATIGUE LOADING OF AUSTENITIC STEEL

© 2024 V.V. Mishakin[1,*], V.A. Klyushnikov[1], A.V. Gonchar[1], O.A. Sergeeva[2,]**

[1]Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Russia 603950 Nizhniy Novgorod, Ul'yanova str., 46
[2]Volga-Spetsgidroenergomontazh – Kamspetsenergo, Russia 423800 Naberezhnye Chelny, Shlyuzovaya str, 8
E-mail: [*]ndt@ipmran.ru; [**]sergeevaoa_kse@mail.ru

The work investigated the effect of fatigue failure on the elastic characteristics of metastable austenitic steel AISI 321: Poisson's ratio and acoustic anisotropy parameter. The elastic characteristics were calculated using ultrasonic measurements of the propagation time of longitudinal and shear elastic waves. The volume fraction of strain-induced martensite was determined by the eddy current method. Theoretical studies have shown that the main factors influencing Poisson's ratio are the accumulation of microdamages and changes in phase composition. The change in the acoustic anisotropy parameter is associated with the influence of cyclic deformation on the crystallographic texture of the material matrix and the formation of oriented crystals of strain-induced martensite. Based on the analysis of experimental results, expressions were obtained for calculating damage and relative accumulated plastic deformation based on acoustic measurement data, which are widely used in engineering practice to determine the fatigue life of structural materials.

Keywords: austenitic stainless steel, fatigue, strain-induced martensitic transformation, ultrasonic method, acoustic anisotropy parameter, Poisson's ratio, eddy current method.

DOI: 10.31857/S0130308224070014

ВВЕДЕНИЕ

Метастабильные аустенитные стали широко используются в ядерной энергетике, химической промышленности, гидроэнергетике и других отраслях машиностроения. Такие производственные и эксплуатационные характеристики этих сплавов, как жаропрочность, жаростойкость, коррозионная стойкость, пластичность, магнитные свойства и др., во многом

определяются структурой металла, в том числе фазовым составом. Применение акустической, магнитной и электромагнитной структуроскопии позволяет оперативно оценивать состояние металлов и сплавов, проводить контроль фазового состава, текстуры, магнитной анизотропии и других характеристик материалов. Изменение магнитных свойств, вызванное мартенситным деформационным превращением при пластическом или упругопластическом деформировании метастабильной аустенитной стали, позволяет устойчиво определять изменение объемной доли α′-мартенсита методами вихретокового или магнитного контроля. Образование фазы деформационного мартенсита может происходить одним из следующих способов: γ-аустенит (ГЦК-решетка, парамагнетик) превращается, как правило, в местах пересечения плоскостей скольжения в α′-мартенсит (ОЦК-решетка, ферромагнетик) [1]. Возможен и переход по следующей схеме: $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$, где ε-мартенсит (ГПУ-решетка, парамагнетик) образуется как предшественник α′-мартенсита, так как обладает нестабильными характеристиками. Ряд исследований магнитных свойств материала аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных хромоникелевых сталей с разным химическим составом проведено сотрудниками Института физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН. В частности, методы магнитной структуроскопии используются для контроля содержания фазы феррита или фазы мартенсита деформации аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных сталей на основе корреляционных связей магнитных параметров с фазовым составом [2]. В работе [3] показано, что измерение параметров предельных петель магнитного гистерезиса, таких как намагниченность насыщения, коэрцитивная сила, позволяет оценить количество мартенсита, индуцированного пластическим деформированием аустенитной стали. В работе [4] получено, что формирование мартенсита деформации в аустенитной стали с отсутствием феррита в исходном состоянии приводит к возникновению магнитной анизотропии. Результаты исследования магнитных характеристик аустенитной стали, полученной методом 3D-лазерной печати, приведены в работе [5], в которой показано влияние скорости деформации на интенсивность изменения магнитных свойств материала. Изменение электромагнитных свойств при циклическом деформировании аустенитной стали предлагается использовать для оценки деградации при контактно-усталостном нагружении [6]

Контроль состояния металлических сплавов также осуществляется с помощью акустической структурометрии. В работе [7] акустическая структурометрия применяется для определения вариации структуры металла, обусловленной нарушениями технологии изготовления или накоплением повреждений в процессе эксплуатации. Для этого в качестве микроструктурно-чувствительных акустических параметров используются скорости продольных и сдвиговых волн. В качестве «базового состояния» структуры металла рассматривается ее состояние и, соответственно, величины акустических характеристик до начала эксплуатации объекта контроля или структуры металла контрольных образцов, прочностные характеристики которых определены стандартными методами разрушающего контроля и находятся в допустимых пределах. Отклонение этих характеристик от базовых определяет степень деградации металла. В работе [8] исследовались зависимости между скоростью распространения ультразвука и механическими характеристиками в процессе одноосного растяжения аустенитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, деформирование которой обеспечивалось благодаря действию различных механизмов (дислокационное скольжение/двойникование, образование дефектов упаковки, мартенситное превращение). Получено, что скорость распространения рэлеевских ультразвуковых волн может использоваться как информативный признак для анализа природы процессов, контролирующих пластичность.

Актуальными являются работы по применению акустической, магнитной и электромагнитной структуроскопии для оценки степени деградации металла при усталостном разрушении. Необходимо учитывать, что образование деформационного мартенсита является значительным фактором, влияющим на ресурсные характеристики материала [9]. Однако использование электромагнитной структурометрии для оценки микроповрежденности затруднено тем, что активное образование ферромагнитной фазы α′-мартенсита не позволяет селектировать относительно малое воздействие микротрещин на показания приборов вихретокового контроля. Тогда как влияние накопления микроповрежденности и фазовых изменений на акустические характеристики соизмеримо.

При выборе структурно-чувствительных параметров особое внимание следует обратить на акустические и упругие параметры, определение которых не связано с измерением акустической длины пути. Погрешность в определении длины пути, необходимой для расчета скоростей упругих волн (УВ), приводит к относительно большим погрешностям их измерения. Прецизионное измерение времени распространения УВ позволяет определять некоторые структурно-чувствительные характеристики, отражающие деградационные процессы при силовом нагружении материалов, с погрешностью существенно меньшей, чем погрешности, получен-

ные при измерении скоростей. В первую очередь, к ним относятся параметр акустической анизотропии [10—12], связанный с эффектом двулучепреломления ультразвуковых волн, и коэффициент Пуассона [13, 14]. Высокая чувствительность этих характеристик к структурным изменениям в поликристаллических материалах позволяет их использовать в качестве диагностических параметров на ранних стадиях разрушения. Особенно это касается метастабильных аустенитных сталей, в которых под воздействием упругопластического и пластического циклического деформирования происходит сложный комплекс структурных преобразований, включая накопление микроповреждений и образование деформационного мартенсита.

Из-за разницы упругих модулей аустенита и мартенсита при фазовом превращении происходит изменение модулей и акустических характеристик материала в целом. На упругие и акустические характеристики кроме фазовых изменений активное влияние оказывает изменение кристаллографической текстуры и накопление микроповреждений [10,14].

Целями работы является исследование влияния усталостного разрушения на коэффициент Пуассона и параметр акустической анизотропии при различных амплитудах деформации цикла, выявление связи этих параметров с ресурсными характеристиками метастабильной аустенитной стали. В качестве ресурсных характеристик в этой работе использовались поврежденность, определяемая согласно гипотезе линейного суммирования повреждений Пальмгрена−Майнера [15] как относительное число циклов нагружения, и относительная накопленная пластическая деформация [16].

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ УСТАЛОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА И ПАРАМЕТР АКУСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ

Для метастабильных аустенитных сталей изменение параметра A связано с изменением кристаллографической текстуры наиболее пластичной фазы — аустенита (ΔA_γ), образованием деформационного мартенсита ($\Delta A_{\alpha'}$), а также накоплением микроповреждений (ΔA_ψ).

В предположении аддитивности влияния этих факторов на общее изменение A запишем:

$$\Delta A = \Delta A_\gamma + \Delta A_{\alpha'} + \Delta A_\psi. \quad (1)$$

При отсутствии фазовых изменений и накопления микроповреждений изменение параметра анизотропии определяется одним из коэффициентов функции распределения ориентировок кристаллов в поликристаллическом материале W_{420} [10]: $\Delta A = \Delta A_\gamma = k_A W_{420}$, где k_A — коэффициент. Для изотропного материала $W_{420} = 0$.

Образование ориентированных кристаллов мартенсита в пересечениях полос скольжения в аустените [17] при деформировании приводит к появлению составляющей $\Delta A_{\alpha'}$. Величина ΔA_ψ становится отличной от нуля, если дефекты, например, микротрещины, имеют неслучайную ориентацию. Все три компоненты зависят от напряженно-деформированного состояния материала при его нагружении.

Исследования показали, что параметр A в поликристаллическом материале меняется даже при небольших амплитудах деформации на начальных стадиях деформирования, включая инкубационную стадию, задолго до стадии образования микротрещин [15]. Заметное изменение A обусловлено тем, что кристаллы, составляющие поликристаллический материал, имеют сильную анизотропию упругих свойств [18]. При случайной ориентации кристаллов упругая анизотропия на макроуровне отсутствует. Небольшая преимущественная ориентация приводит к анизотропии упругих свойств материала в целом и к проявлению эффекта двулучепреломления соответственно. Большая часть ресурса материала до образования макротрещины характеризуется доминированием составляющих ΔA_γ и $\Delta A_{\alpha'}$ в выражении (1). В предположении того, что изменение параметра A связано, в основном, с изменением кристаллографической текстуры $\Delta A_\psi \approx 0$, следует:

$$\Delta A = \Delta A_\gamma + \Delta A_{\alpha'}. \quad (2)$$

Связь модулей упругости с коэффициентом Пуассона записывается в виде [19]:

$$\nu = \frac{1 - 2\mu/3K}{2 + 2\mu/3K}, \quad (3)$$

где μ — модуль сдвига; K — модуль всестороннего сжатия.

Изменения модулей в результате образования фаз можно рассчитать, используя различные приближения, например, приближение Фойгта [20]. В этом случае выражение для расчета модулей двухфазного материала имеет вид:

$$M_c = M_1\Phi_1 + M_2\Phi_2 = M_1(1 - \Phi_2) + M_2\Phi_2, \quad (4)$$

где M_c — модуль упругости всего материала; M_1 и M_2 — модули упругости фазы 1 и фазы 2 соответственно; Φ_1 и Φ_2 — содержание первой и второй фазы, $\Phi_1 + \Phi_2 = 1$. В нашем случае фаза 1 — γ-фаза, фаза 2 — α′-мартенсит.

Фазовые превращения приводят к изменению модулей K и μ и, следовательно, к изменению коэффициента Пуассона (см. уравнение (3)).

В работе [21] получено, что оценочные значения модуля всестороннего сжатия K_A и модуля сдвига μ_A аустенита составляют 161,3 и 79,0 ГПа, деформационного мартенсита 166,4 и 70,4 ГПа соответственно. Согласно [17], объемная доля α′-мартенсита при циклическом деформировании может достигать несколько десятков процентов. В соответствии с выражениями (3) и (4), увеличение объемной доли магнитной фазы на 20 % приводит к увеличению коэффициента Пуассона на 1,8 % при его начальном значении $\nu_0 = 0{,}29$, что на порядок больше погрешности измерения этого коэффициента современными акустическими методами [22].

Другим фактором, влияющим на коэффициент Пуассона, является микроповрежденность ψ. Для сфероидальных дефектов, типа пор или дефектов, близких по форме к ним, методами микромеханики получена связь изменения составляющей коэффициента Пуассона $\Delta\nu_\psi$ с ψ [23]:

$$\Delta\nu_\psi = \nu - \nu_0 = -\frac{3\left(1-\nu_0^2\right)\left(5\nu_0 - 1\right)}{2\left(7 - 5\nu_0\right)}\psi, \quad (5)$$

где ν_0 — коэффициент Пуассона неповрежденного материала.

Для дефектов типа трещин зависимость изменения коэффициента Пуассона от микроповрежденности ψ выражается как [24]:

$$\Delta\nu_\psi = \nu - \nu_0 = -\frac{16}{15}\frac{\nu_0\left(1-\nu_0^2\right)\left(3-\nu_0\right)}{\left(2-\nu_0\right)}\psi. \quad (6)$$

Величина микроповрежденности может определяться через изменение плотности материала: $\psi = \dfrac{\Delta\rho_\psi}{\rho_0}$ ($\Delta\rho_\psi$ — изменение плотности, связанное с образованием пор, микротрещин; ρ_0 — плотность неповрежденного материала).

Для стали AISI 321 (аналог стали 12Х18Н10Т) при ее циклическом нагружении до появления макротрещины величина ψ составляет около 0,3 % [25]. При $\nu_0 = 0{,}29$ относительное уменьшение коэффициента Пуассона вследствие накопления поврежденности в виде трещин согласно выражению (6) составит 0,46 %, что соизмеримо с влиянием на коэффициент фазовых изменений. Наличие микропор согласно выражению (5) изменит коэффициент Пуассона на 0,12 %. В отличие от параметра акустической анизотропии, величина которого при отсутствии преимущественной ориентации кристаллов близка или равна нулю, наличие слабой кристаллографической текстуры не оказывает заметного влияния на коэффициент Пуассона. Таким образом, изменение ν в результате циклического деформирования стали AISI 321 в основном определяется фазовыми превращениями и процессом накопления микроповреждений:

$$\Delta\nu = \Delta\nu_\psi + \Delta\nu_{\alpha'}. \quad (7)$$

Проведенный анализ показал, что изменение параметра акустической анизотропии и коэффициента Пуассона отражают основные деградационные процессы при усталостном разрушении метастабильных сталей: накопление микроповреждений, фазовые превращения и изменения кристаллографической текстуры. Определение связи ресурсных характеристик с этими параметрами позволит использовать данные неразрушающего контроля при расчете остаточного ресурса с учетом фактического состояния материала конструкции.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования проводились на образцах, изготовленных из метастабильной аустенитной стали AISI 321, имеющей следующий химический состав (масс. %): C 0,02; Si 0,43; Mn 0,74; Cr 17,76; Ni 9,16; Ti 0,32; S 0,002; P 0,033; Cu 0,23.

Циклическое деформирование (одноосное растяжение—сжатие) образцов выполнялось поэтапно на универсальной машине BISS Nano до образования макротрещины длиной 1 мм. Испытания проводились при контроле полной деформации цикла с коэффициентом асимметрии $\Delta\varepsilon = 0$ и амплитудами деформаций цикла $\Delta\varepsilon/2$ от 0,25 до 0,7 %, частота нагружения ~ 2 Гц. Температура испытания комнатная. На всем протяжении испытаний регистрировалась петля гистерезиса и определялась величина односторонне накопленной пластической деформации ε^p как сумма пластической деформации ε_N^p в N-м полуцикле растяжения $\varepsilon^p = \sum_N \varepsilon_N^p$. Образцы были вырезаны вдоль направления проката листового катаного материала. Форма образцов и схема установки преобразователей приведена на рис. 1.

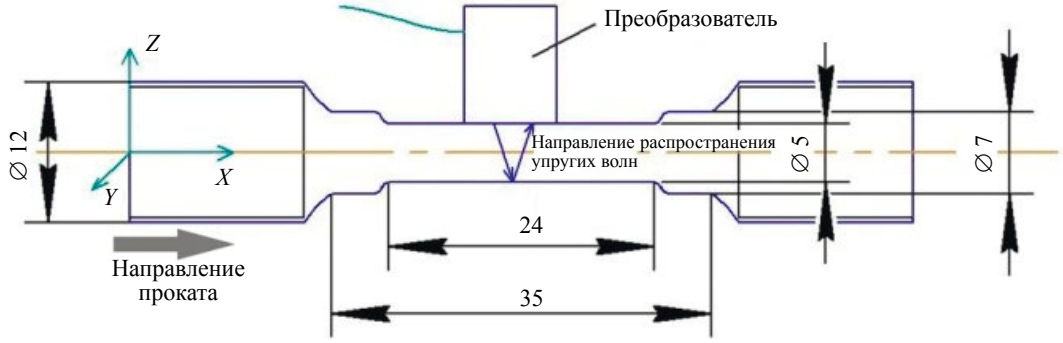

Рис. 1. Образец для усталостных испытаний и схема установки преобразователей.

Таблица 1

Число циклов до разрушения N_f при исследуемых амплитудах деформаций

$\Delta\varepsilon/2$, %	0,25	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6	0,7
N_f	32177	16528	7500	4173	2100	1450	800

В табл. 1 приведены амплитуды деформации и число циклов до разрушения N_f исследуемых образцов.

Для исследования влияния процесса циклического деформирования на упругие характеристики материала применялся эхо-импульсный метод ультразвукового контроля.

Полученные амплитудно-временные диаграммы эхо-импульсов показаны на рис. 2*а* для продольной и на рис. 2*б* для поперечной волны. Время распространения упругих волн $t = 0{,}5(t_3 - t_1)$ измерялось между первым t_1 и третьим t_3 отраженными импульсами по точкам перехода нуля между минимумом и максимумом в импульсе (см. рис. 2*а*).

Измерения времени выполнялось в трех зонах, расположенных на рабочей части образца, 5 раз в каждой зоне. Результаты усреднялись. Более подробная методика измерения времен распространения продольных и поперечных волн приведена в [23].

Используя полученные данные времен распространения волн, были рассчитаны параметр акустической анизотропии и коэффициент Пуассона ν. Для ортотропного материала (лист, уголки, швеллеры и т.п.) параметр акустической анизотропии A выражается как [10]:

$$A = \frac{2\left(t_{zx} - t_{zy}\right)}{t_{zy} + t_{zx}} = \frac{2\left(V_{zy} - V_{zx}\right)}{V_{zy} + V_{zx}}, \tag{8}$$

где V_{zx}, V_{zy}, t_{zx} и t_{zy} — скорости и времена поперечных УВ, распространяющихся перпендикулярно направлению проката вдоль оси Z и поляризованных вдоль осей X и Y ортотропного матери-

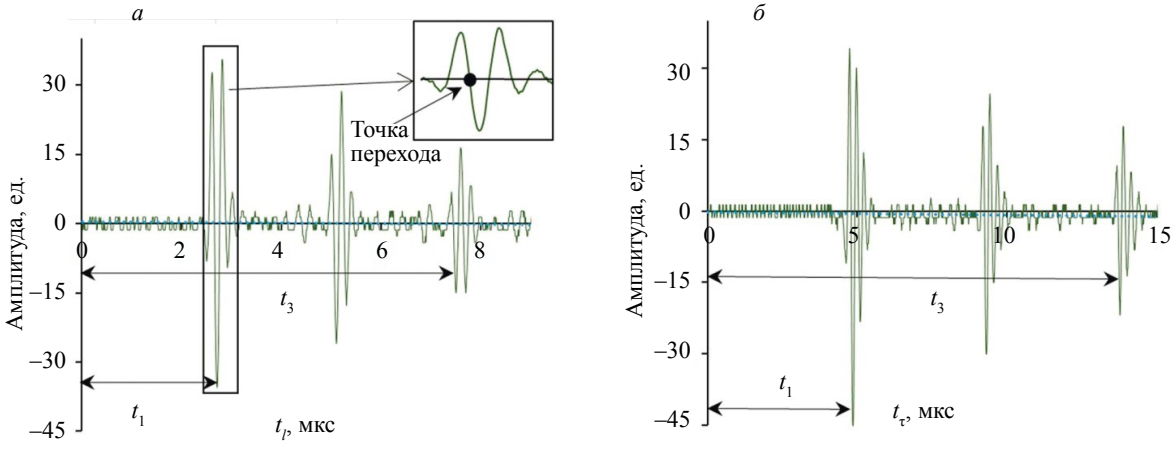

Рис. 2. Амплитудно-временные диаграммы эхо-импульсов продольной (*а*) и поперечной волн (*б*).

ала (см. рис. 1). Разница скоростей поперечных волн V_{zx} и V_{zy} связана с эффектом акустического двулучепреломления. При $V_{zx} = V_{zy}$ двулучепреломление отсутствует ($A = 0$).

Коэффициент Пуассона ν определяется для изотропного материал следующим образом [26]:

$$\nu = \frac{\left(\frac{t_t}{t_l}\right)^2 - 2}{2\left(\left(\frac{t_t}{t_l}\right)^2 - 1\right)} = \frac{\left(\frac{V_l}{V_t}\right)^2 - 2}{2\left(\left(\frac{V_l}{V_t}\right)^2 - 1\right)}, \qquad (9)$$

где t_l и V_l — время и скорость продольных волн, распространяющихся и поляризованных вдоль оси Z. Для материала со слабой анизотропией можно записать $t_t = (t_{zx} + t_{zy}) / 2$ и $V_l = V_{zz}$. Можно отметить, что скорости поперечных волн определяют изменение коэффициента Пуассона в большей степени, чем скорости продольных волн.

Переход от расчета параметров ν и A с помощью соотношения скоростей волн к расчету с помощью соотношения времен распространения можно осуществить в случае использования эхо-импульсного метода на плоских элементах конструкции при фиксированной акустической длине пути, определяемой толщиной конструкции. Это позволяет на порядок уменьшить погрешность измерения этих характеристик.

Максимальная погрешность измерения времени составляет 1-2 нс. Относительная погрешность измерения времени распространения УВ около $3 \cdot 10^{-5}$. Частота ультразвуковых сигналов составляла 5 МГц, ширина импульсов для поперечных волн составляла 500 нс, для продольных около 600 нс. Малая погрешность измерения времени распространения поперечных и продольных упругих волн позволяет определять по соотношению времен параметр A и коэффициент Пуассона ν (выражения (8) и (9)) с погрешностью не более $5 \cdot 10^{-4}$.

С помощью многофункционального вихретокового прибора «МВП-2М» проводилось измерение объемной доли Ф α′-мартенсита до и после каждого этапа нагружения. Прибор был предварительно откалиброван на образцах с известным содержанием ферритной фазы. Относительная погрешность измерения не превышала 5 %.

Измерения проводились в исходном состоянии и после каждого этапа нагружения. В неповрежденном материале содержание фазы мартенсита составляло в среднем около 0,2 %, коэффициент Пуассона $\nu_0 = 0{,}291$, параметр акустической анизотропии — 0,0034.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены зависимости ΔA и $\Delta\nu$ от величины накопленной пластической деформации ε^p для различных значений амплитуды деформации $\Delta\varepsilon/2$.

Как видно из рис. 3, интенсивность изменения параметров $\Delta\nu$ и ΔA существенно зависит от амплитуды деформации $\Delta\varepsilon/2$. Зависимость изменения коэффициента Пуассона от накопленной циклической деформации близка к линейной. Максимальное изменение коэффициента Пуассона

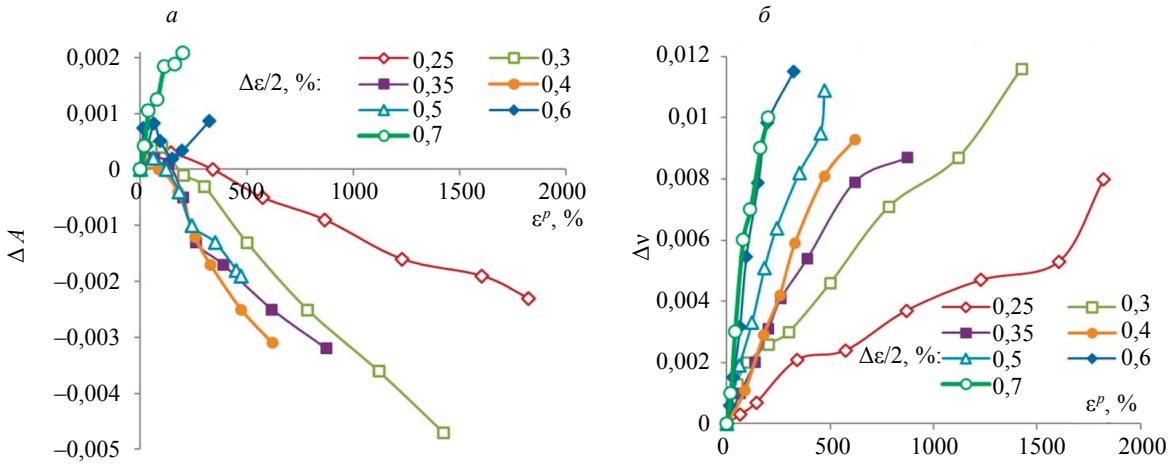

Рис. 3. Зависимости изменения параметра A (*а*) и коэффициента Пуассона ν (*б*) от величины накопленной деформации ε^p.

от его начального значения составляет 4 %. Максимальное изменения параметра A от –0,0037 до –0,005 происходит при амплитуде деформации $\Delta\varepsilon/2 = 0{,}3$ %.

Как видно из рис. 3*а*, величина ΔA при амплитудах 0,6 и 0,7 % имеет положительное значение, тогда как при других амплитудах деформации значение ΔA в основном отрицательное. Это можно объяснить тем, что при малых амплитудах деформации эффект изменения кристаллографической текстуры матрицы превалирует над влиянием мартенситного превращения, которое для этих амплитуд имеет небольшую интенсивность (рис. 4). При больших амплитудах деформации цикла, характерных для области, близкой к повторно статическому нагружению (0,6 и 0,7 %), параметр A увеличивается на всем протяжении нагружения из-за интенсивного образования мартенсита. Такое поведение ΔA подтверждается данными, полученными в [27] для случая статического растяжения.

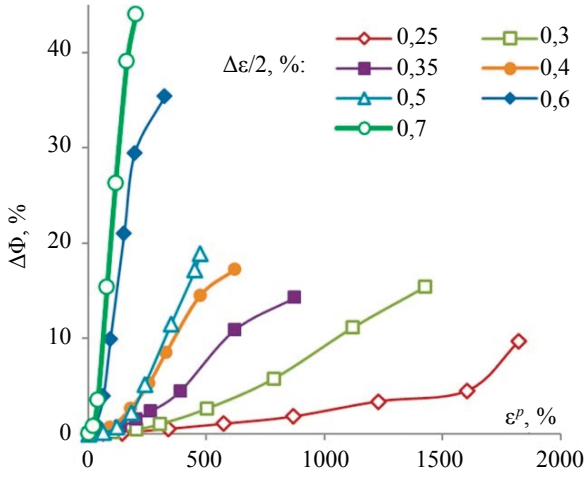

Рис. 4. Зависимости изменения объемной доли деформационного мартенсита Ф от величины накопленной пластической деформации ε^p.

Интенсивность изменения объемной доли α′-мартенсита также определяется амплитудой деформации (см. рис. 4). Изменение объемной доли мартенсита деформации при образовании микротрещины при амплитуде 0,25 % составляет 9,7 %, при амплитуде 0,7 % — 43,4 %.

Связь параметров $\Delta\nu$ и ΔA приведена на рис. 5. Как видно из рис. 5, при амплитудах деформации 0,25—0,4 % угол наклона кривых $\Delta\nu(\Delta A)$ практически одинаковый. Для амплитуд 0,5—0,7 %, характерных для малоцикловой усталости, углы наклона кривых существенно различается.

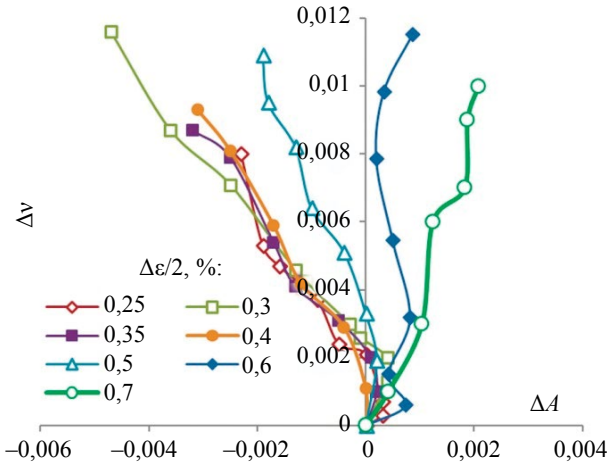

Рис. 5. Связь параметров Δν и ΔA.

Проведенный множественный регрессионный анализ показал, что зависимости поврежденности D_{calc} (относительное число циклов) и относительной накопленной пластической деформации $\varepsilon^{p}_{n(\text{calc})}$ от параметров Δν и ΔA можно представить в виде следующих выражений:

$$D_{\text{calc}} = k_{1\psi}\Delta\nu + k_{2\psi}\Delta A + k_{3\psi}\Delta\nu\Delta A, \tag{10}$$

где $k_{1\psi} = 76{,}8$; $k_{2\psi} = -117{,}2$; $k_{3\psi} = 7553{,}2$;

$$\varepsilon^{p}_{n(\text{calc})} = k_{1\varepsilon}\Delta\nu + k_{2\varepsilon}\Delta A + k_{3\varepsilon}\Delta\nu\Delta A, \tag{11}$$

где $k_{1\varepsilon} = 85{,}5$; $k_{2\varepsilon} = -104{,}4$; $k_{3\varepsilon} = 8146$. Величина ε^{p}_{n} определялась как отношение величины текущей накопленной пластической деформации ε^{p} к ее величине в момент образования макротрещины ε^{p}_{f}. Величины D_{calc} и $\varepsilon^{p}_{n(\text{calc})}$ изменяются от 0 до 1 включительно.

Корреляционное поле поврежденности D_{calc} и относительной накопленной пластической деформации $\varepsilon^{p}_{n(\text{calc})}$, рассчитанных с помощью выражений (10) и (11) соответственно, с их значениями, определенными экспериментально, приведено на рис. 6 и 7.

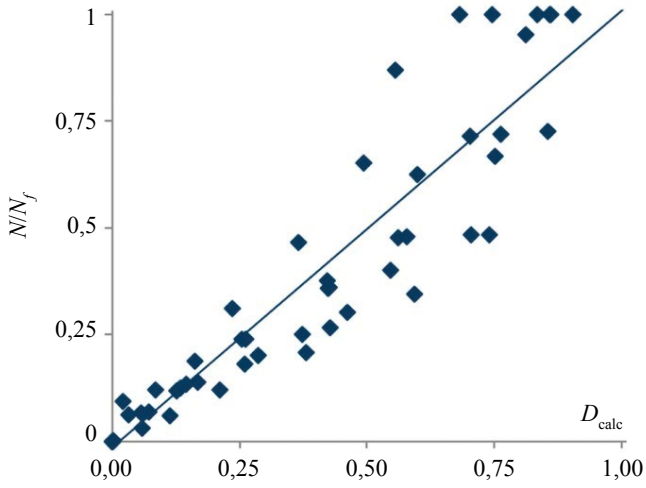

Рис. 6. Корреляционное поле между поврежденностью Пальмгрена—Майера и ее расчетным значением.

Коэффициент корреляции между расчетными и экспериментальными значениями (см. рис. 6 и рис. 7) составляет 0,93. Погрешность оценки поврежденности D_{calc} и относительного значения накопленной пластической деформации $\varepsilon^{p}_{n(\text{calc})}$ с помощью выражений (10) и (11) в среднем составляет около 20 %. Ресурс материала можно определить с помощью выражения $\text{Re} = 1 - D_{\text{calc}}$.

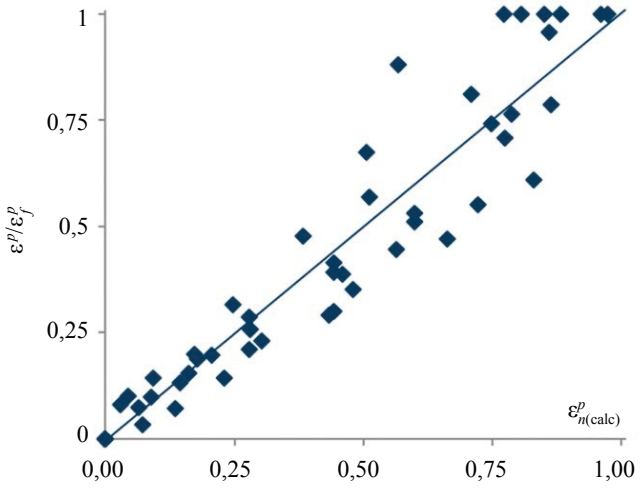

Рис. 7. Корреляционное поле между расчётной и экспериментальной относительной накопленной пластической деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования показали, что деградационные процессы на ранних стадиях усталостного разрушения метастабильной аустенитной стали AISI 321 приводят к заметным изменениям ее акустических и упругих хактеристик. Образование микронесплошностей в виде микропор, микротрещин, увеличение объемной доли мартенсита в процессе циклического деформирования, имеющего модули упругости, отличные по величине от модулей матрицы, ведут к изменению коэффициента Пуассона. Появление ориентированных кристаллов мартенсита и изменение кристаллографической текстуры матрицы меняют анизотропию упругих свойств, в том числе параметр акустической анизотропии, отражающий эффект двулучепреломления ультразвуковых волн.

Получены выражения, связывающие изменения коэффициента Пуассона и параметра акустической анизотропии с поврежденностью материала и относительной накопленной пластической деформацией. Исследования показали высокий коэффициент корреляции между расчетными и экспериментальными значениями поврежденности и накопленной пластической деформацией, что позволяет применять акустический метод для оценки ресурсных характеристик метастабильных аустенитных сталей на ранней стадии разрушения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №24-29-00857 (https://rscf.ru/project/24-29-00857/).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гольдштейн М.И., Литвинов В.С., Бонфин Б.М.* Металлофизика высокопрочных сплавов. М.: Металлургия, 1986. 312 с.

2. *Ригмант М.Б., Корх М.К.* Контроль фазового состава и магнитных свойств изделий ответственного назначения из аустенитно-ферритных и аустенитно-мартенситных сталей // Вестник Концерна ВКО «Алмаз—Антей». 2020. № 3. С. 45—53.

3. *Корх М.К., Ригмант М.Б., Давыдов Д.И., Шишкин Д.А., Ничипурук А.П., Корх Ю.В.* Определение фазового состава трехфазных хромоникелевых сталей по магнитным свойствам // Дефектоскопия. 2015. № 12. С. 20—31.

4. *Ригмант М.Б., Казанцева Н.В., Кочнев А.В., Коэмец Ю.Н., Корх Ю.В., Корх М.К., Карабаналов М.С.* Выявление магнитной анизотропии в аустенитной хромоникелевой стали после прокатки // Дефектоскопия. 2021. № 12. С. 56—62.

5. *Казанцева Н.В., Коэмец Ю.Н., Шишкин Д.А., Ежов И.В. Давыдов Д.И., Ригмант М.Б., Кочнев А.В.* Магнитное исследование деформированной медицинской аустенитной стали, изготовленной на лазерном 3D принтере // Физика металлов и металловедение. 2022. Т. 123. № 11. С. 1210—1217.

6. *Саврай Р.А., Коган Л.Х.* Вихретоковый контроль усталостной деградации метастабильной аустенитной стали при гигацикловом контактно-усталостном нагружении // Дефектоскопия. 2021. № 5. С. 56—63.

7. *Пасманик Л.А., Камышев А.В., Радостин А.В., Зайцев В.Ю.* Параметры акустической неоднородности для неразрушающей оценки влияния технологии изготовления и эксплуатационной поврежденности на структуру металла // Дефектоскопия. 2020. № 12. С. 24—36.

8. *Баранникова С.А., Надежкин М.В., Исхакова П.В.* Исследование механических и акустических свойств деформируемых сплавов // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2023. Т. 66 (2). С. 162—167.

9. *Терентьев В.Ф., Колмаков А.Г., Блинов В.М.* Влияние мартенсита деформации на усталость аустенитных коррозионно-стойких сталей // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 6. С. 2—9.

10. *Sayers C. M., Allen D. R.* The influence of stress on the principal polarisation directions of ultrasonic shear waves in textured steel plates // J. Phys. D: Appl. Phys. 1984. V. 17. P. 1399—1413.

11. *Хлыбов А.А., Углов А.Л.* Об акустическом методе контроля пространственной неоднородности пластической деформации слабо анизотропных ортотропных материалов // Дефектоскопия. 2023. № 1. С. 25—36.

12. *Хлыбов А.А., Углов А.Л., Рябов Д.А., Аносов М.С.* Оценка поврежденности конструкционных металлических материалов акустическими методами // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25. № 4. С. 18—26.

13. *Carvajal L., Artigas A., Monsalve A., Vargas Y.* Acoustic birefringence and Poisson's ratio determined by ultrasound: tools to follow-up deformation by cold rolling and recrystallization // Mat. Res. 2017. V. 20. P. 1—7.

14. *Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Kachanov M.L.* On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy // Int. J. Eng. Sci. 2021. V. 168. No. 103567.

15. *Коллинз Дж.* Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 624 с.

16. *Романов А.Н.* Малоцикловая усталость конструкционных металлических материалов // Вестник научно-технического развития. 2015. № 12 (100). С. 42—62.

17. *Krupp U., West C., Christ H.-J.* Deformation-induced martensite formation during cyclic deformation of metastable austenitic steel: Influence of temperature and carbon content // Mat. Sci. Eng. A. 2008. V. 481—482. P. 713—717.

18. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 308 с.

19. *Ерофеев В.И.* Волновые процессы в твердых телах с микроструктурой. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1999. 328 с.

20. *Шермергор Т.Д.* Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 400 с.

21. *Сергеева О.А., Мишакин В.В., Клюшников В.А.* Исследование связи характеристик циклического деформирования с модулями упругости метастабильных аустенитных сталей // Проблемы прочности и пластичности. 2024. Т. 86. № 1. С. 94—105.

22. *Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A.* The effect of phase transformations induced by cyclic loading on the elastic properties and plastic hysteresis of austenitic stainless steel // Int. J. Fatigue. 2018. V. 106. P. 153—158.

23. *Kachanov M., Sevostianov I.* Micromechanics of Materials, with Applications. Cham: Springer, 2018. 712 p.

24. *Салганик Р.Л.* Механика тел с большим числом трещин // Механика твердого тела. 1973. № 4. С. 149—158.

25. *Kachanov M. L, Mishakin V. V., Pronina U.G.* On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part II: Extraction of information on microcrack density from a combination of the acoustic and eddy current data // Int. J. Eng. Sci. 2021. V. 169. No. 103569.

26. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.

27. *Klyushnikov V.* Influence of plastic deformation temperature on ultrasonic and electromagnetic properties of austenitic steel // Materials Today: Proceedings. 2019. V. 19 (5). P. 2320—2322.

REFERENCES

1. *Gol'dshtein M., Litvinov V., Bronfin B.* Metallophysics of high-strength alloys. Moscow: Metallurgia, 1986. 312 p.

2. *Rigmant M.B., Korkh M.K.* Control of the phase composition and magnetic properties of products made of austenitic-ferritic and austenitic-martensitic steels // Journal of «Almaz — Antey» Air and Space Defence Corporation. 2020. V. 3. P. 45—53.

3. *Korkh M.K., Rigmant M.B., Davydov D.I., Shishkin D.A., Nichipuruk A.P., Korkh Yu.V.* Determination of the phase composition of three-phase chromium–nickel steels from their magnetic properties // Defectoskopya. 2015. No. 12. P. 20—31.

4. *Rigmant M.B., Kazantseva N.V., Kochnev A.V., Koemets Yu.N., Korkh Yu.V., Korkh M.K., Karabanalov M.S.* Revealing Magnetic Anisotropy in Austenitic Chromium—Nickel Steel After Rolling // Defectoskopya. 2021. No. 12. P. 56—62.

5. *Kazantseva N.V., Koemets Y.N., Shishkin D.A., Ezhov I.V., Davydov D.I., Rigmant M.B., Kochnev A. V.* A Magnetic Study of Deformed Medical Austenitic Steel Manufactured by 3D Laser Printing // Phys. Metals Metallogr. 2022. V. 123. P. 1139—1146.

6. *Savrai R.A., Kogan L.K.* Eddy Current Testing of Fatigue Degradation of Metastable Austenitic Steel under Gigacycle Contact-Fatigue Loading // Defectoskopya. 2021. No. 5. P. 56—63.

7. *Pasmanik L.A., Kamyshev A.V., Radostin A.V., Zaitsev V.Yu.* Parameters of Acoustic Inhomogeneity for Nondestroductive Estimation of the Influence of Manufacturing Technology and Operational Damage on the Structure of Metal // Defectoskopya. 2020. No. 12. P. 24—36.

8. *Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Iskhakova P.V.* Mechanical and acoustic properties of deformable alloys // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2023. V. 66 (2). P. 162—167.

9. *Terent'ev V.F., Kolmakov A.G., Blinov V.M.* Influence of deformation martensite on fatigue of austenitic stainless steels // Deformatsiya i Razrushenie materialov. 2007. V. 6. P. 2—9.

10. *Sayers C.M., Allen D.R.* The influence of stress on the principal polarisation directions of ultrasonic shear waves in textured steel plates // J. Phys. D: Appl. Phys. 1984. V. 17. P. 1399—1413.

11. *Khlybov A.A., Uglov A.L.* On an Acoustic Testing Method for Monitoring the Spatial Inhomogeneity of Plastic Deformation in Weakly Anisotropic Orthotropic Materials // Defectoskopya. 2023. No. 1. P. 25—36.

12. *Khlybov A.A., Uglov A.L., Ryabov D.A., Anosov M.S.* Evaluation of Structural Metal Materials Damage by Acoustic Methods // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2022. V. 25. No. 4. P. 18—26.

13. *Carvajal L., Artigas A., Monsalve A., Vargas Y.* Acoustic birefringence and Poisson's ratio determined by ultrasound: tools to follow-up deformation by cold rolling and recrystallization // Mat. Res. 2017. V. 20. P. 1—7.

14. *Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Kachanov M.L.* On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy // Int. J. Eng. Sci. 2021. V. 168. No. 103567.

15. *Collins J.A.* Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention / 2nd ed. New York: Wiley, 1993. 624 p.

16. *Romanov A.N.* Low-cycle fatigue of structural metal materials // Vestni nauchnogo I teknicheskogo razvitiya. 2015. No.12 (100). P. 42—62.

17. *Krupp U., West C., Christ H.-J.* Deformation-induced martensite formation during cyclic deformation of metastable austenitic steel: Influence of temperature and carbon content // Mat. Sci. Eng. A. 2008. V. 481—482. P. 713—717.

18. *Truell R., Elbaum C., Chick B.B.* Ultrasonic Methods in Solid State Physics. New York: Academic, 1969. 308 p.

19. *Erofeev V.I.* Wave processes in solids with microstructure. Moscow: Publishing house Mosk. Un-ta, 1999. 328 p.

20. *Shermergor T.D.* Theory of elasticity of micro-inhomogeneous media. Moscow: Nauka, 1977. 400 p.

21. *Sergeeva O.A., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A.* Study of the relationship between fatigue characteristics and elastic modulus of metastable austenitic steels // Problems of Strength and Plasticity. 2024. V. 86 (1). P. 94—105.

22. *Gonchar A.V., Mishakin V.V., Klyushnikov V.A.* The effect of phase transformations induced by cyclic loading on the elastic properties and plastic hysteresis of austenitic stainless steel // Int. J. Fatigue. 2018. V. 106. P. 153—158.

23. *Kachanov M., Sevostianov I.* Micromechanics of Materials, with Applications. Cham: Springer, 2018. 712 p.

24. *Salganik R.L.* Mechanics of bodies with a large number of cracks // Mechanics of solids. 1973. No. 4. P. 149—158.

25. *Kachanov M.L, Mishakin V.V., Pronina U.G.* On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part II: Extraction of information on microcrack density from a combination of the acoustic and eddy current data // Int. J. Eng. Sci. 2021. V. 169. No. 103569.

26. Non-destructive testing and diagnostics / Ed. V.V. Klyuev. M.: Mashinostroenie, 1995. 487 p.

27. *Klyushnikov V.* Influence of plastic deformation temperature on ultrasonic and electromagnetic properties of austenitic steel // Materials Today: Proceedings. 2019. V. 19 (5). P. 2320—2322.