



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 7

2024



НАУКА
— 1727 —

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
Основан в феврале 1965 года
Екатеринбург

№ 7
2024

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

- В.В. Мишакин, В.А. Ключников, А.В. Гончар, О.А. Сергеева.** Использование коэффициента Пуассона и параметра акустической анизотропии для оценки поврежденности и накопленной пластической деформации при усталостном разрушении аустенитной стали 3

Электромагнитные методы

- В.В. Дякин, О.В. Кудряшова, В.Я. Раевский.** Некоторые случаи явного выражения напряженности результирующего поля магнетиков, помещенных в поле внешних источников 14

Тепловые методы

- С.М. Magoda, T.N. Ngonda, В.П. Вавилов, Д.Ю. Кладов.** Диагностика скрытой воды в сотовых панелях стеклопластик—Nomex при изменяющейся в пространстве ориентации панелей 28
- С.Е. Черных, В.П. Вавилов, В.Н. Костин, Ю.И. Комоликов, Д.Ю. Кладов.** Тепловой контроль корундовой керамики: классические методики при оптическом нагреве 42

Радиоволновые методы

- И.В. Бызов, С.В. Жаков, А.А. Мысик, И.А. Кунаккужин.** Определение концентрации лития в пластовых водах методом ЯМР-релаксометрии 53

По материалам XXXV Уральской конференции «Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения)»

- Р.М. Абашев, А.И. Бояринцев, И.И. Мильман, А.Д. Петракович, А.И. Сюрдо.** Сравнительные характеристики люминесцентных детекторных материалов на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ для нейтронной дозиметрии 58
- Н.В. Гордеев, А.Н. Сташков, А.М. Матосян, М.К. Корх, А.П. Ничипурук, Д.А. Шишкин, И.Г. Ширинкина.** Магнитные свойства и структура изготовленных селективным лазерным сплавлением образцов из конструкционной углеродистой стали и подвергнутых усталостным испытаниям 62
- К.Е. Мызнов, О.Н. Василенко, В.Н. Костин, В.С. Тронза, А.Н. Бондина, С.С. Кукушкин, Н.Ю. Трякина.** Изменение магнитных характеристик труб при гидро- и пневмоиспытаниях магистральных трубопроводов 67
- К.В. Гоголинский, А.С. Уманский, А.С. Голев, К.И. Доронин, К.А. Томский.** Анализ способов расчета модуля упругости при динамическом инструментальном индентировании 72
- Информация 77

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. Ключников¹, А.В. Гончар¹, О.А. Сергеева^{2,**}

¹ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики

им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»,

Россия 603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

²ООО «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 вихрековым 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, вихрековый 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. Klyushnikov¹, A.V. Gonchar¹, O.A. Sergeeva^{2,**}

¹Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of

Sciences, Russia 603950 Nizhny Novgorod, Ul'yanova str., 46

²Volga-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 12X18H10T, 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, контролирующей 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 селективно 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 (ΔA_α), 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 ΔA_α . Величина ΔA_ψ становится отличной от нуля, если дефекты, например, микротрещины, имеют неслучайную ориентацию. Все три компонента 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 ΔA_α 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]:

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

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 нескольких 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]:

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

где ν_0 — коэффициент Пуассона неповрежденного материала.

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

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

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

Для стали AISI 321 (аналог стали 12X18H10T) 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. %): С 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 $\Delta\epsilon = 0$ и амплитудами деформаций цикла $\Delta\epsilon/2$ 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 $\epsilon^p = \sum_N \epsilon_N^p$. Образцы были вырезаны вдоль направления проката листового катаного материала. Форма образцов и схема установки преобразователей приведена на рис. 1.

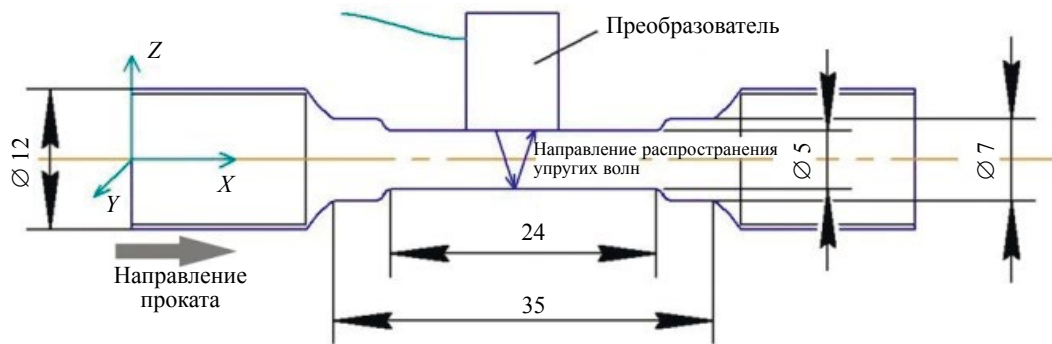


Рис. 1. Образец для усталостных испытаний и схема установки преобразователей.

Таблица 1

Число циклов до разрушения N_f при исследуемых амплитудах деформаций

$\Delta\epsilon/2$, %	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. 2а для продольной и на рис. 2б 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. 2а).

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]:

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

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-

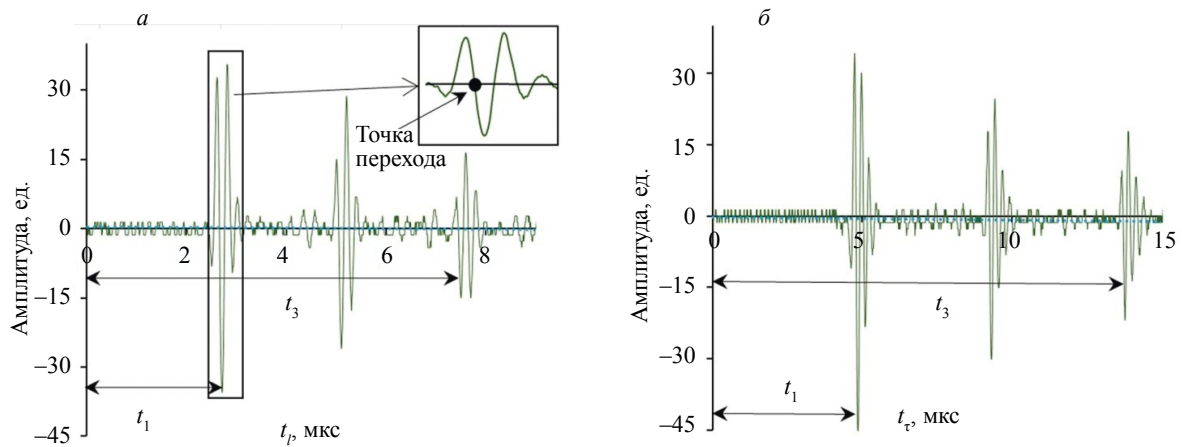


Рис. 2. Амплитудно-временные диаграммы эхо-импульсов продольной (а) и поперечной волн (б).

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 материала следующим образом [26]:

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

где t_l и V_l — время и скорость продольных волн, распространяющихся и поляризованных вдоль оси Z. Для материала со слабой анизотропией можно записать $t_l = (t_{zx} + t_{zy}) / 2$ 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 Φ 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

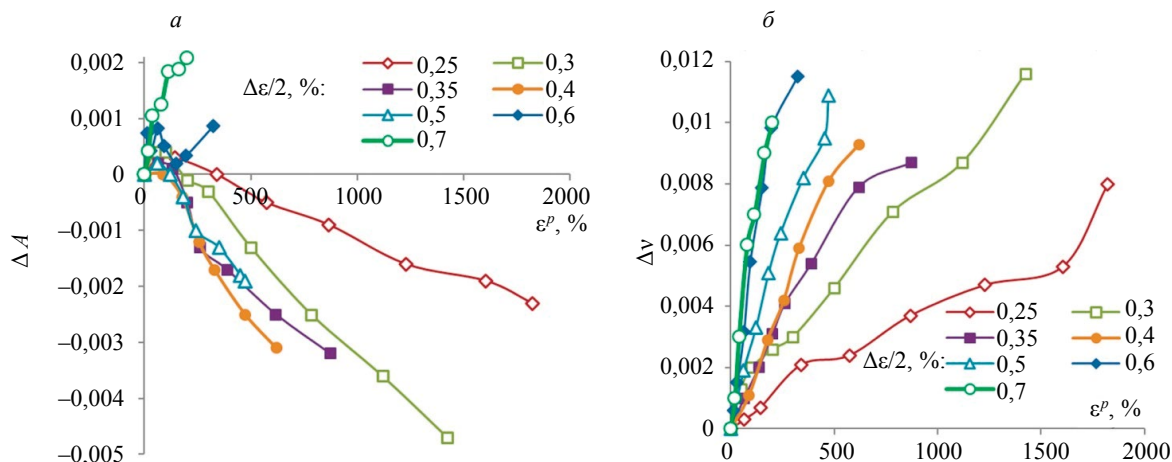


Рис. 3. Зависимости изменения параметра A (а) и коэффициента Пуассона ν (б) от величины накопленной деформации ε^p .

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. 3а, 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.

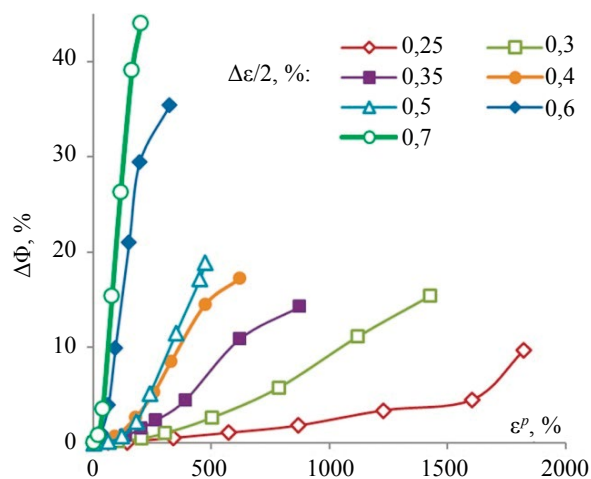
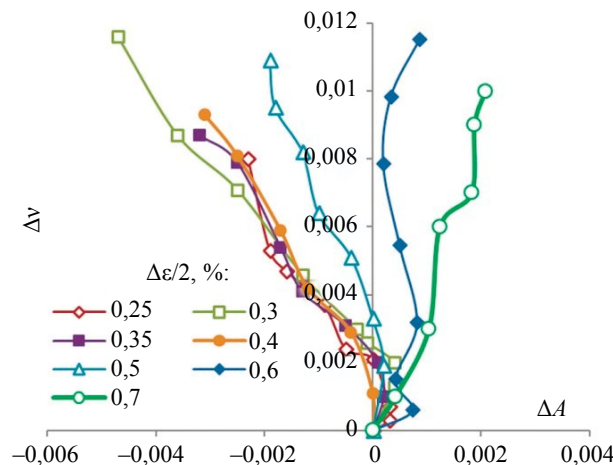


Рис. 4. Зависимости изменения объемной доли деформационного мартенсита Φ от величины накопленной пластической деформации ε^p .

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 малоциклового усталости, углы наклона кривых существенно различается.

Рис. 5. Связь параметров Δv и ΔA .

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

$$D_{\text{calc}} = k_{1\psi} \Delta v + k_{2\psi} \Delta A + k_{3\psi} \Delta v \Delta A, \quad (10)$$

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

$$\varepsilon_{n(\text{calc})}^p = k_{1\varepsilon} \Delta v + k_{2\varepsilon} \Delta A + k_{3\varepsilon} \Delta v \Delta A, \quad (11)$$

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

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

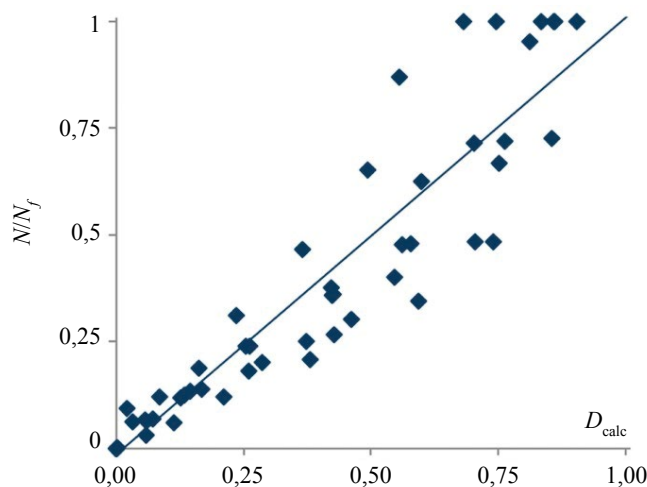


Рис. 6. Корреляционное поле между поврежденностью Пальмгрена—Майера и ее расчетным значением.

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 $\varepsilon_{n(\text{calc})}^p$ с помощью выражений (10) и (11) в среднем составляет около 20 %. Ресурс материала можно определить с помощью выражения $\text{Re} = 1 - D_{\text{calc}}$.

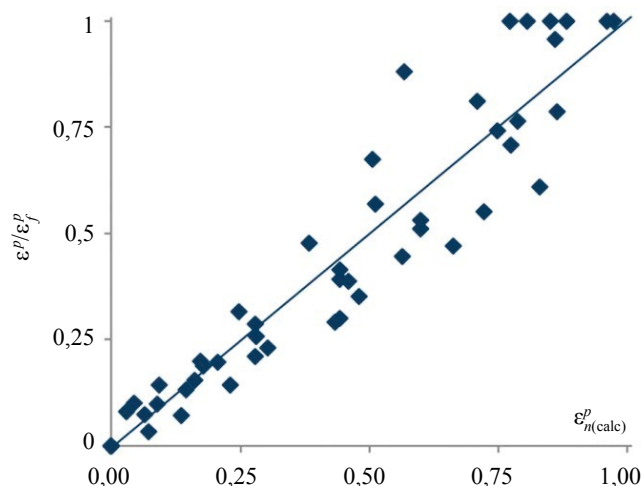


Рис. 7. Корреляционное поле между расчётной и экспериментальной относительной накопленной пластической деформации.

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 характеристик. 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., Карабанов 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., Надеждин 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., Ключников 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 // Defektoskopiya. 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 // Defektoskopiya. 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 // *Defektoskopya*. 2021. No. 5. P. 56—63.
7. Pasmanik L.A., Kamyshev A.V., Radostin A.V., Zaitsev V.Yu. Parameters of Acoustic Inhomogeneity for Nondestructive Estimation of the Influence of Manufacturing Technology and Operational Damage on the Structure of Metal // *Defektoskopya*. 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 // *Defektoskopya*. 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 tekhnicheskogo 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. Shermorgor 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.

НЕКОТОРЫЕ СЛУЧАИ ЯВНОГО ВЫРАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО ПОЛЯ МАГНЕТИКОВ, ПОМЕЩЕННЫХ В ПОЛЕ ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ

© 2024 г. В.В. Дякин¹, О.В. Кудряшова^{1,*}, В.Я. Раевский^{1,**}

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620137 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18
E-mail: *kudryashova_ov@imp.uran.ru; **ravskii@mail.ru

Поступила в редакцию 31.05.2024; после доработки 16.06.2024
Принята к публикации 21.06.2024

Приведены формулы для вычисления напряженности результирующего магнитного поля от магнетиков с заданным распределением намагниченности или погруженного в заданное поле внешних источников. Собраны именно те случаи, когда вычисление по этим формулам может быть выполнено пользователем, не имеющим большого опыта в области вычислительной математики и программирования. А именно, в указанных случаях формулы для напряженности в большинстве своем выражаются в конечном виде через элементарные функции либо требуют использования одной из стандартных подпрограмм, имеющихся в библиотеке любого языка программирования. Такие формулы могут служить как справочным материалом, так и для решения соответствующих задач с подходящими реальными объектами, а также для определения оптимальных стратегий и оптимального набора входных параметров при использовании универсальных пакетов программ и оценки погрешности получаемых при этом результатов.

Ключевые слова: магнитостатика, расчет напряженности полей.

SOME CASES OF EXPLICIT EXPRESSION OF THE RESULTING FIELD STRENGTH OF MAGNETS PLACED IN THE FIELD OF EXTERNAL SOURCES

© 2024 V. V. Dyakin¹, O. V. Kudryashova^{1,*}, V. Y. Raevskii^{1,**}

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Russia 620108 Yekaterinburg, Sofya Kovalevskaya Str., 18
E-mail: *kudryashova_ov@imp.uran.ru; **ravskii@mail.ru

Formulas for calculating of the resulting magnetic field strength of magnets with a given magnetization distribution or given field of external sources are presented. We have collected exactly those cases where a user who does not have much experience in the field of computational mathematics and programming can perform calculations using these formulas. Namely, in these cases formulas for tension are mostly expressed in final form through elementary functions or require the use of one of the standard subroutines available in the library of any programming language. Such formulas can serve both as reference material and for solving corresponding problems with suitable real objects, as well as for determining optimal strategies and the optimal set of input parameters when using universal software packages and assessing the error of the results obtained.

Keywords: magnetostatics, calculation of magnetic field strength.

DOI: 10.31857/S0130308224070027

1. ВВЕДЕНИЕ

Для решения многих практических задач из области магнетизма, например, задач неразрушающего магнитного контроля, актуальной является проблема создания и программной реализации алгоритмов аналитического или численного решения задач магнитостатики по вычислению напряженности результирующего поля применительно к магнитным телам различной формы, помещенным во внешнее магнитное поле. Решение этой проблемы развивается в двух направлениях. Прежде всего, расширяется круг задач (в смысле усложнения геометрии исследуемых магнетиков, характера их магнитной проницаемости, конфигурации внешнего поля), для которых получены либо точные аналитические формулы вычисления указанной напряженности, либо предложены численно-аналитические алгоритмы, реализованные в компьютерных программах и дающие ответ с контролируемой задаваемой точностью. Но круг таких задач пока еще недостаточно широк и исчерпывается, в основном, конфигурациями однородных и изотропных магнетиков идеальных геометрических форм с идеальными же формами дефектов в них. Во многих же реальных задачах геометрия исследуемых магнетиков и/или характер их магнитной проницаемости достаточно сложны и не поддаются пока решению указанными ана-

литическими или численно-аналитическими методами с задаваемой и контролируемой точностью. Поэтому в последнее время бурное развитие получило создание так называемых универсальных пакетов программ (типа ANSYS или ELCUT), реализующих численный метод конечных элементов. Главное преимущество таких программных продуктов — их универсальность в плане формальной возможности применения к самому широкому кругу магнитостатических задач, возникающих для описания полей от магнетиков практически произвольной формы с достаточно общими типами линейной и нелинейной связи в материальных соотношениях. Однако сама по себе возможность применения вычислительного пакета совсем не гарантирует адекватность получаемых результатов. Практическое применение таких программ таит в себе множество подводных камней, подробному описанию которых посвящена работа [1]. Одним из основных их недостатков является существенная субъективность необходимого выбора предлагаемых стратегий расчета и многочисленных входных параметров (например, выбор типа конечных элементов, их расположение, густота сетки соответствующих узлов в различных частях расчетной области), который должен сделать сам пользователь в соответствии со своим опытом и интуицией, и от которого в значительной степени количественно и качественно зависят результаты расчетов. Такая многовариантность выбора стратегии и параметров расчетов (и невозможность перепробовать все заложенные возможности наряду с отсутствием внятных критериев выбора) всегда оставляет сомнение в действительной оптимальности сделанного выбора. Другим существенным недостатком универсальных пакетов является отсутствие в большинстве случаев сколько-нибудь полного представления о величине погрешности полученных результатов, без которого ценность применения таких программ становится весьма сомнительной.

Выходом, на наш взгляд, является комбинированное использование указанных двух подходов в том направлении, чтобы достоинства программ, реализующих точные методы решения, в возможной мере помогли нивелировать основные недостатки пакетов универсальных программ путем их тестирования. Для каждой реальной задачи желательно найти из имеющейся уже достаточно широкой базы точно решаемых (в указанном выше смысле) задач по возможности наиболее близкую к ней (по форме и конфигурации магнетиков, их физическим параметрам). После этого задать используемому универсальному пакету геометрические и физические параметры именно этой вспомогательной задачи (для которой получены результаты с гарантированной точностью), а затем подбирать стратегии и многочисленные субъективные параметры универсального пакета именно из критерия наибольшего совпадения с полученными точными результатами. Определив таким образом оптимальную стратегию и оптимальные субъективно задаваемые универсальному пакету параметры, получить представление о точности получаемых при этом результатов. Затем в этой стратегии и с этими параметрами запустить универсальную программу для реальной задачи. И тогда можно иметь представление об оценке погрешности получаемого при этом результата.

Одной из проблем такого подхода является тот факт, что для большинства точно решаемых задач вывод формул и описание соответствующего алгоритма вычисления напряженности поля в достаточной мере нетривиальных случаях геометрии магнетика и конфигурации внешнего поля содержится лишь в журнальных статьях, причем самостоятельное составление компьютерной программы для реализации предлагаемого алгоритма требует достаточно высокой квалификации и большого опыта в области применения вычислительной математики и программирования. У большинства пользователей универсальных пакетов такой квалификации и опыта нет, что затрудняет тестирование программ с помощью точно решаемых задач. Однако во многих упрощающих частных случаях (например, постоянное внешнее поле, постоянная магнитная проницаемость) формулы, описывающие общие алгоритмы, значительно упрощаются и для составления соответствующей компьютерной программы требуют от пользователя небольшого опыта непосредственного программирования явных аналитических выражений, содержащих элементарные функции, или, в крайнем случае, использования лишь несложных стандартных подпрограмм, имеющихся в библиотеке любого языка программирования.

Такие упрощенные формулы, собранные в настоящей работе, могут служить как справочным материалом, так и для решения соответствующих задач с подходящими реальными объектами, а также для предложенного выше подхода определения оптимальных стратегий и оптимального набора входных параметров при использовании универсальных пакетов программ и оценки погрешности получаемых результатов. Ниже приводится описание некоторых упомянутых ситуаций, соответствующие формулы для нахождения напряженности результирующего поля и ссылки на литературу (не обязательно первоисточники), где приведен их вывод. Все приводимые формулы проверялись, по возможности, на соответствующих предельных случаях формы магнетика с известными ответами, а также на выполнение граничных условий для напряженности.

2. МАГНЕТИКИ С ПЛОСКИМИ ГРАНИЦАМИ

2.1. Поле однородно намагниченного прямого параллелепипеда [2]

Однородно намагниченное тело в пространственной декартовой системе координат занимает область $[-a, a] \times [-b, b] \times [-c, c]$ в форме прямого параллелепипеда. Намагниченность внутри тела постоянна и направлена вдоль оси x : $\mathbf{M} = \{M, 0, 0\}$ (см. рис. 1). Тогда вне поверхности тела напряженность результирующего магнитного поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}) \equiv \mathbf{H}(x, y, z) = \{H_x(x, y, z), H_y(x, y, z), H_z(x, y, z)\}$ имеет вид:

$$H_x(x, y, z) = \frac{M}{4\pi} [E(x-a, b-y, c-z) + E(x-a, b+y, c-z) + E(x-a, b-y, c+z) + E(x-a, b+y, c+z) - E(x+a, b-y, c-z) - E(x+a, b+y, c-z) - E(x+a, b-y, c+z) - E(x+a, b+y, c+z)];$$

$$H_y(x, y, z) = \frac{M}{4\pi} \ln \left[\frac{D(c-z, x+a, y+b)D(-c-z, x+a, y-b)D(-c-z, x-a, y+b)D(c-z, x-a, y-b)}{D(-c-z, x+a, y+b)D(c-z, x+a, y-b)D(c-z, x-a, y+b)D(-c-z, x-a, y-b)} \right],$$

$$H_z(x, y, z) = \frac{M}{4\pi} \ln \left[\frac{D(b-y, x+a, z+c)D(-b-y, x+a, z-c)D(-b-y, x-a, z+c)D(b-y, x-a, z-c)}{D(-b-y, x+a, z+c)D(b-y, x+a, z-c)D(b-y, x-a, z+c)D(-b-y, x-a, z-c)} \right],$$

где $E(\alpha, \beta, \gamma) = \arctg \left(\frac{\beta\gamma}{\alpha\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}} \right)$, $D(\alpha, \beta, \gamma) = \alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}$.

2.2. Поле внутри и вне бесконечной пластины конечной толщины [3, с. 133, 243], [4, с. 13, 14]

Однородная пластина с магнитной проницаемостью $\mu = \text{const}$ расположена между двумя параллельными плоскостями в постоянном внешнем поле с напряженностью $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0, H_y^0, H_z^0\} = \text{const}$. Ось z декартовой системы координат перпендикулярна граничным плоскостям. Тогда напряженность результирующего поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \{H_x(\mathbf{r}), H_y(\mathbf{r}), H_z(\mathbf{r})\}$ в точке $\mathbf{r} = (x, y, z)$ вне пластины совпадает с напряженностью внешнего поля, а внутри пластины

$$H_x(\mathbf{r}) = H_x^0, \quad H_y(\mathbf{r}) = H_y^0, \quad H_z(\mathbf{r}) = \frac{1}{\mu} H_z^0.$$

2.3. Поле неоднородного пространства и полупространства [5, с. 157], [6, с. 127]

Пространство разделено плоскостью S на два однородных полупространства с различными магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2 (см. рис. 2). Ось z декартовой системы координат перпендикулярна плоскости раздела S , уравнение которой $z = z_0$. Внешнее поле с напряженностью $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0(x, y, z), H_y^0(x, y, z), H_z^0(x, y, z)\}$ во всем пространстве постоянно: $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0, H_y^0, H_z^0\} = \text{const}$. Тогда результирующее поле $\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \{H_x(\mathbf{r}), H_y(\mathbf{r}), H_z(\mathbf{r})\}$ в каждом полупространстве тоже постоянно, причем в произвольной точке $\mathbf{r} = (x, y, z) \notin S$ будет $H_x(\mathbf{r}) = H_x^0$, $H_y(\mathbf{r}) = H_y^0$ как для $z < z_0$, так и $z > z_0$, а

$$H_z(\mathbf{r}) = \frac{2\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} H_z^0, \quad z > z_0; \quad H_z(\mathbf{r}) = \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_2} H_z^0, \quad z < z_0. \quad (1)$$

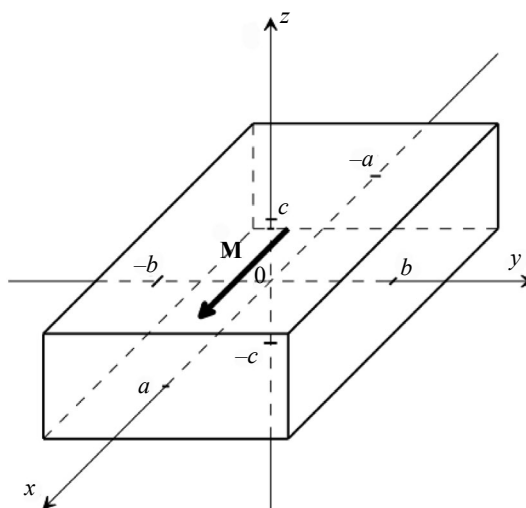


Рис. 1. Однородно намагниченный параллелепипед.

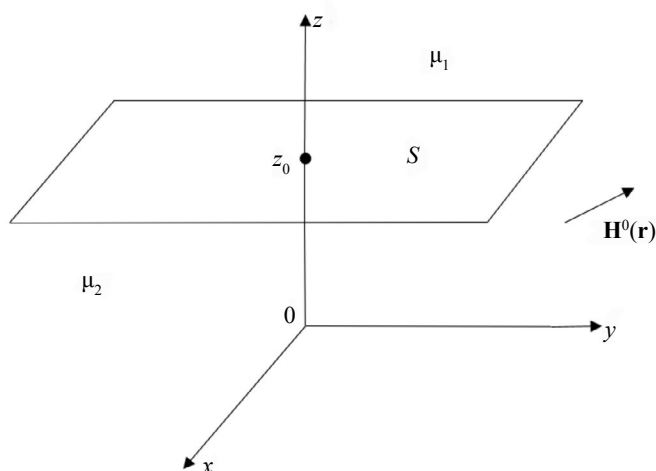


Рис. 2. Неоднородное пространство.

Несложно обобщить эти формулы на тот случай, когда постоянна только z -компонента напряженности внешнего поля $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0(\mathbf{r}), H_y^0(\mathbf{r}), H_z^0\}$, $H_z^0 = \text{const}$. Тогда

$$H_x(\mathbf{r}) = H_x^0(\mathbf{r}), \quad H_y(\mathbf{r}) = H_y^0(\mathbf{r}), \quad z < z_0 \text{ или } z > z_0, \quad (2)$$

а для $H_z(\mathbf{r})$ выполнено соотношение (1). Если же предположить, что для внешнего поля $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0(\mathbf{r}), H_y^0(\mathbf{r}), H_z^0(\mathbf{r})\}$ компонента $H_z^0(\mathbf{r})$ постоянна только на границе S полупространств $H_z^0(\mathbf{r}) = h = \text{const}$ для $z = z_0$, то выполнены соотношения (2), а $H_z(\mathbf{r}) = H_z^0(\mathbf{r}) - bh$, $z > z_0$; $H_z(\mathbf{r}) = H_z^0(\mathbf{r}) + bh$, $z < z_0$, где $b := (\mu_1 - \mu_2) / (\mu_1 + \mu_2)$. Полагая в вышеупомянутых формулах $\mu_1 = 1$ или $\mu_2 = 1$, получим соответствующие формулы для магнитного полупространства.

2.4. Поле над двухслойным полупространством [7]

Полупространство $z < d_2$ с граничной плоскостью S_2 с уравнением $z = d_2$ состоит из слоя $d_1 < z < d_2$ с постоянной магнитной проницаемостью μ и внутреннего полупространства $z < d_1$ с граничной плоскостью S_1 с уравнением $z = d_1$ и постоянной магнитной проницаемостью μ_d . На рис. 3 изображено сечение описанной конфигурации плоскостью $x = 0$. Внешнее поле постоянно с напряженностью $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0, H_y^0, H_z^0\} = \text{const}$.

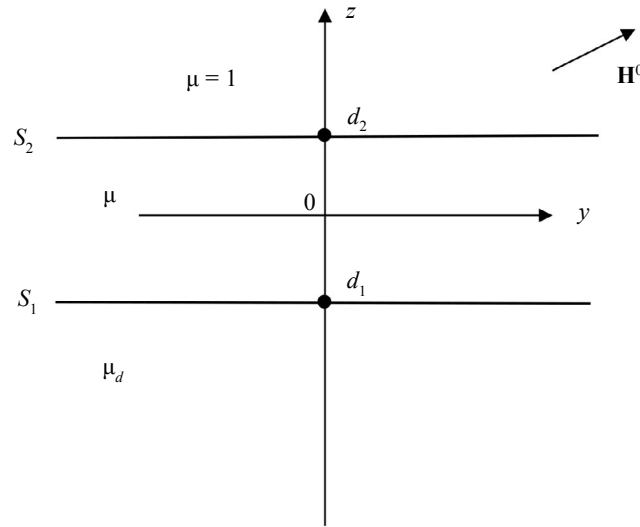


Рис. 3. Двухслойное полупространство.

Тогда напряженность результирующего поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \{H_x(\mathbf{r}), H_y(\mathbf{r}), H_z(\mathbf{r})\}$ в произвольной точке $\mathbf{r} = (x, y, z)$ над двухслойным полупространством $z > d_2$ тоже постоянна:

$$H_x(\mathbf{r}) = H_x^0, \quad H_y(\mathbf{r}) = H_y^0, \quad H_z(\mathbf{r}) = \frac{2\mu_d}{\mu_d + 1} H_z^0.$$

Интересно, что наличие в полупространстве верхнего слоя конечной толщины $d_1 < z < d_2$ с магнитной проницаемостью μ не влияет на напряженность поля над двухслойным полупространством.

3. МАГНЕТИКИ ШАРООБРАЗНОЙ ФОРМЫ

3.1. Поле однородно намагниченного шара [8, с. 141], [9]

Напряженность $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ поля, создаваемого в произвольной точке $\mathbf{r} = (x, y, z)$ однородно намагниченным (намагниченность $\mathbf{M} = \{M_1, M_2, M_3\} = \text{const}$) шаром с центром $\mathbf{r}_0 = \{x_0, y_0, z_0\}$ радиуса R вне и внутри него, может быть вычислена по формулам:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{R^3}{3|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^5} \left[3(\mathbf{M} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0))(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) - |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^2 \mathbf{M} \right], \quad |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0| \geq R;$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{3} \mathbf{M}, \quad |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0| < R.$$

Здесь $(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b})$ означает скалярное произведение векторов.

3.2. Поле внутри и вне однородного шара в однородной среде при постоянном внешнем поле [10, с. 278], [11, с. 203], [6, с. 129, 208]

В однородную среду с магнитной проницаемостью μ_2 помещен однородный шар радиуса R с проницаемостью μ_1 , внешнее поле $\mathbf{H}^0 = \{H_x^0, H_y^0, H_z^0\} = \text{const}$. Начало декартовой системы координат в центре шара. Напряженность результирующего магнитного поля внутри шара является постоянной:

$$\mathbf{H} = \frac{3\mu_2}{\mu_1 + 2\mu_2} \mathbf{H}^0,$$

а в произвольной точке $\mathbf{r} = (x, y, z)$ вне шара:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{H}^0 + \frac{(\mu_1 - \mu_2)R^3}{(\mu_1 + 2\mu_2)r^3} \left[\frac{3}{r^2} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{H}^0) \mathbf{r} - \mathbf{H}^0 \right], \quad \text{где } r = |\mathbf{r}|.$$

Для случая $\mu_2 = 1$ (шар в воздухе или в вакууме) эти формулы приведены в работах [4], [12, с. 245], [13, с. 90] (в последней с опечаткой).

3.3. Поле концентрических шаров с разными проницаемостями в постоянном внешнем поле [14, с. 184]

Два концентрических шара радиусов R_1 и R_2 ($R_2 < R_1$) помещены в постоянное внешнее поле с напряженностью $\mathbf{H}^0 = \text{const}$. Магнитная проницаемость внутреннего шара μ_2 , а проницаемость между границами шаров μ_1 . Центр декартовой системы координат в общем центре шаров, а ось z направлена вдоль $\mathbf{H}^0$, таким образом, $\mathbf{H}^0 = \{0, 0, H^0\} = \text{const}$. Напряженность результирующего магнитного поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \{H_x(\mathbf{r}), H_y(\mathbf{r}), H_z(\mathbf{r})\}$ в точке $\mathbf{r} = (x, y, z)$ вне наружного шара (т.е. $r := |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} > R_1$) вычисляется по формуле $\mathbf{H}(\mathbf{r}) = H^0 \nabla \left[z \left(1 - C_0 R_1^3 / r^3 \right) \right]$ или, раскрывая градиент, покомпонентно:

$$H_x(\mathbf{r}) = \frac{3C_0 R_1^3 xz}{r^5} H^0, \quad H_y(\mathbf{r}) = \frac{3C_0 R_1^3 yz}{r^5} H^0, \quad H_z(\mathbf{r}) = \left[1 + \frac{C_0 R_1^3 (2z^2 - x^2 - y^2)}{r^5} \right] H^0,$$

$$\text{где } C_0 := \frac{\mu_1 - 1 + (2\mu_1 + 1)A}{\mu_1 + 2 + 2(\mu_1 - 1)A}, \quad A := \frac{(\mu_2 - \mu_1)R_2^3}{(\mu_2 + 2\mu_1)R_1^3}.$$

Из формул, приведенных в [11, с. 184], несложно вывести формулы для напряженности магнитного поля и внутри шаров. Напряженность в «шаровом слое» ($R_2 < r < R_1$):

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = H^0 \nabla \left[z \left(C_1 + C_2 R_1^3 / r^3 \right) \right]$$

или покомпонентно:

$$H_x(\mathbf{r}) = -\frac{3C_2 R_1^3 xz}{r^5} H^0, \quad H_y(\mathbf{r}) = -\frac{3C_2 R_1^3 yz}{r^5} H^0, \quad H_z(\mathbf{r}) = \left[C_1 - \frac{C_2 R_1^3 (2z^2 - x^2 - y^2)}{r^5} \right] H^0,$$

$$C_1 := \frac{2\mu_1 + 1 - 2C_0(\mu_1 - 1)}{3\mu_1}, \quad C_2 := \frac{\mu_1 - 1 - C_0(\mu_1 + 2)}{3\mu_1}.$$

Напряженность поля во внутреннем шаре ($r < R_2$):

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = H^0 \left(C_1 + C_2 R_1^3 / R_2^3 \right) \nabla z \quad \text{или покомпонентно:}$$

$$H_x(\mathbf{r}) = H_y(\mathbf{r}) = 0, \quad H_z(\mathbf{r}) = \left(C_1 + \frac{C_2 R_1^3}{R_2^3} \right) H^0.$$

3.4. Поле неоднородного шара, погруженного в постоянное внешнее поле [15], [16]

Шаровой магнетик радиуса R погружен в постоянное магнитное поле. Начало декартовой системы координат в центре шара. Рассматривается модельная магнитная проницаемость неоднородного шара $\mu(\mathbf{r}) = c_0 e^{\alpha r}$ ($r := |\mathbf{r}|$, c_0 и α — постоянные параметры, $c_0 > 0$, α — любого знака), напряженность постоянного внешнего поля $\mathbf{H}^0 = \{H_x^0, H_y^0, H_z^0\} = \text{const}$.

Напряженность результирующего поля $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ в произвольной точке $\mathbf{r} = (x, y, z)$ внутри шара ($r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} < R$) вычисляется по формуле:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \frac{3R}{(d+2)F(R)} \nabla A(\mathbf{r}), \quad A(\mathbf{r}) := \frac{F(r)}{r} (xH_x^0 + yH_y^0 + zH_z^0),$$

а напряженность $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ вне шара ($r > R$) — по формуле:

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \left[1 - \frac{(d-1)R^3}{d+2} \right] \nabla B(\mathbf{r}), \quad B(\mathbf{r}) := \frac{xH_x^0 + yH_y^0 + zH_z^0}{r^3}.$$

В этих формулах:

$$d := -c_0 e^{\alpha R} \left[\frac{\alpha R (e^{-\alpha R} - 1 + \alpha R)}{e^{-\alpha R} - 1 + \alpha R - \frac{\alpha^2 R^2}{2}} + 2 \right], \quad F(r) := \frac{e^{-\alpha r} - 1 + \alpha r - \frac{\alpha^2 r^2}{2}}{r^2}.$$

При вычислении компонент вектора градиента $\nabla A(\mathbf{r})$ можно использовать формулу для производной от функции $F(r)$:

$$F'(r) := -\frac{2}{r^3} \left(e^{-\alpha r} - 1 + \alpha r - \frac{\alpha^2 r^2}{2} \right) - \frac{\alpha}{r^2} (e^{-\alpha r} - 1 + \alpha r).$$

4. МАГНЕТИКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

4.1. Поле внутри и вне бесконечного кругового цилиндра, внешнее поле постоянно [4], [12], [17], [18]

Однородный круговой цилиндр бесконечной длины с постоянной магнитной проницаемостью $\mu = \text{const}$ и радиусом R поперечного сечения в постоянном внешнем поле с напряженностью $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0, H_y^0, H_z^0\} = \text{const}$. Уравнение цилиндра в трехмерном пространстве $x^2 + y^2 \leq R^2$, т.е. вся ось z декартовой системы координат находится внутри цилиндра и совпадает с его осью. Тогда напряженность результирующего поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \{H_x(\mathbf{r}), H_y(\mathbf{r}), H_z(\mathbf{r})\}$ в точке $\mathbf{r} = (x, y, z)$ внутри цилиндра ($\sqrt{x^2 + y^2} < R$) вычисляется по формулам:

$$H_x(\mathbf{r}) = \frac{2}{\mu + 1} H_x^0, \quad H_y(\mathbf{r}) = \frac{2}{\mu + 1} H_y^0, \quad H_z = H_z^0.$$

Напряженность поля вне цилиндра в точке $\mathbf{r} = (x, y, z)$ ($\sqrt{x^2 + y^2} > R$):

$$H_x(\mathbf{r}) = H_x^0 + \frac{\lambda R^2}{(x^2 + y^2)^2} [H_x^0(x^2 - y^2) + 2H_y^0 xy];$$

$$H_y(\mathbf{r}) = H_y^0 + \frac{\lambda R^2}{(x^2 + y^2)^2} [2H_x^0 xy + H_y^0(y^2 - x^2)];$$

$$H_z(\mathbf{r}) = H_z^0, \quad \lambda := \frac{\mu - 1}{\mu + 1}.$$

4.2. Поле на оси бесконечного кругового цилиндра в произвольном внешнем поле [18]

Тот же цилиндр, но внешнее поле произвольно $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0(\mathbf{r}), H_y^0(\mathbf{r}), H_z^0(\mathbf{r})\}$, $\mathbf{r} = (x, y, z)$. Тогда компоненты напряженности результирующего поля $\mathbf{H}(0, 0, z)$ на оси цилиндра:

$$H_x(0, 0, z) = H_x^0(0, 0, z) - \frac{\lambda}{2} \left[b_1 + b_0 + \frac{\hat{z}}{\sqrt{1 + \hat{z}^2}} (b_1 - b_0) \right];$$

$$H_y(0, 0, z) = H_y^0(0, 0, z) - \frac{\lambda}{2} \left[c_1 + c_0 + \frac{\hat{z}}{\sqrt{1 + \hat{z}^2}} (c_1 - c_0) \right];$$

$$H_z(0,0,z) = H_z^0(0,0,z) + \frac{\lambda}{(1-2\lambda\sqrt{\pi}A_0)\sqrt{1+\hat{z}^2}}(a_0 - a_1),$$

где $\lambda := \frac{\mu-1}{\mu+1}$, $\hat{z} := z/R$; $A_0 = 0,282095299\dots$;

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [H_x^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, -\infty) \cos \varphi + H_y^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, -\infty) \sin \varphi] d\varphi;$$

$$b_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [H_x^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, -\infty) \cos \varphi + H_y^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, -\infty) \sin \varphi] \cos \varphi d\varphi;$$

$$c_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [H_x^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, -\infty) \cos \varphi + H_y^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, -\infty) \sin \varphi] \sin \varphi d\varphi;$$

$$a_1 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [H_x^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, +\infty) \cos \varphi + H_y^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, +\infty) \sin \varphi] d\varphi;$$

$$b_1 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [H_x^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, +\infty) \cos \varphi + H_y^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, +\infty) \sin \varphi] \cos \varphi d\varphi;$$

$$c_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} [H_x^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, +\infty) \cos \varphi + H_y^0(R \cos \varphi, R \sin \varphi, +\infty) \sin \varphi] \sin \varphi d\varphi.$$

В этих формулах для модели бесконечного цилиндра введено формально обозначение $f(x, y, \pm\infty) := \lim_{z \rightarrow \pm\infty} f(x, y, z)$. При использовании формул этой модели для расчета напряженности поля на оси достаточно длинного цилиндра нужно в эти формулы вместо $+\infty$ подставлять z -координату верхнего торца цилиндра, а вместо $-\infty$ подставлять z -координату нижнего торца цилиндра.

В случае постоянного внешнего поля $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0, H_y^0, H_z^0\} = \text{const}$ эти формулы приводят к известным формулам внутри бесконечного цилиндра.

4.3. Поле на оси полубесконечного кругового цилиндра при постоянном внешнем поле [19]

Однородный круговой цилиндр бесконечной (в одном направлении) длины с постоянной магнитной проницаемостью $\mu = \text{const}$ и радиусом R поперечного сечения в постоянном внешнем поле с напряженностью $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0, H_y^0, H_z^0\} = \text{const}$, $\mathbf{r} = (x, y, z)$. Уравнение цилиндра в трехмерном пространстве описывается системой неравенств $x^2 + y^2 \leq R^2$, $z \geq d$, т.е. ось цилиндра лежит на оси z декартовой системы координат, нижнее основание лежит в плоскости с уравнением $z = d$, а верхнее «ушло» в бесконечность (см. рис. 4). Тогда напряженность результирующего поля $\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \{H_x(\mathbf{r}), H_y(\mathbf{r}), H_z(\mathbf{r})\}$ в точке $\mathbf{r} = (0, 0, z)$ на оси цилиндра ($z > d$) или ее продолжении ($z < d$) вычисляется по формулам:

$$H_x(0,0,z) = \left[1 - \frac{\lambda}{2} \left(1 + \frac{\bar{z}}{\sqrt{\bar{z}^2 + 1}} \right) \right] H_x^0, \quad H_y(0,0,z) = \left[1 - \frac{\lambda}{2} \left(1 + \frac{\bar{z}}{\sqrt{\bar{z}^2 + 1}} \right) \right] H_y^0,$$

$$H_z(0,0,z) = \left[1 - \lambda \left(\text{sgn}(\bar{z}) - \frac{\bar{z}}{\sqrt{\bar{z}^2 + 1}} \right) \right] H_z^0, \quad \text{sgn}(x) := \frac{x}{|x|}, \quad \lambda := \frac{\mu-1}{\mu+1}, \quad \bar{z} := \frac{z-d}{R}.$$

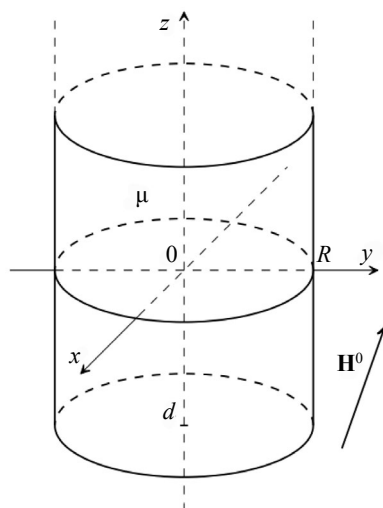


Рис. 4. Полубесконечный цилиндр.

4.4. Поле внутри и вне бесконечного цилиндра с эллипсоидальным сечением [4], [12]

Рассмотрим однородный магнетик ($\mu = \text{const}$), занимающий область Ω в форме бесконечного цилиндра с эллипсоидальным поперечным сечением и координатной осью z в качестве оси цилиндра, помещенный во внешнее поле с напряженностью $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0(\mathbf{r}), H_y^0(\mathbf{r}), H_z^0(\mathbf{r})\}$, постоянное в области цилиндра $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0, H_y^0, H_z^0\} = \text{const}$, $\mathbf{r} \in \Omega$ (см. рис. 5). Граница Γ сечения такого цилиндра плоскостью $z = 0$ суть эллипс с уравнением:

$$\Gamma: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

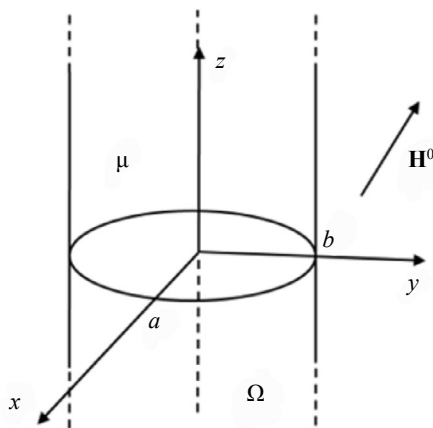


Рис. 5. Бесконечный цилиндр с эллипсоидальным сечением.

Тогда результирующее поле внутри цилиндра тоже постоянно с напряженностью $\mathbf{H}^{(i)}(\mathbf{r}) = \{H_x^{(i)}, H_y^{(i)}, H_z^{(i)}\}$, где

$$H_x^{(i)} = \frac{a+b}{a+\mu b} H_x^0, \quad H_y^{(i)} = \frac{a+b}{b+\mu a} H_y^0, \quad H_z^{(i)} = H_z^0.$$

При $a = b = R$ получаются известные формулы для поля внутри кругового цилиндра.

Напряженность поля вне рассматриваемого цилиндра $\mathbf{H}^{(e)}(\mathbf{r}) = \{H_x^{(e)}(\mathbf{r}), H_y^{(e)}(\mathbf{r}), H_z^{(e)}(\mathbf{r})\}$ в точке $\mathbf{r} = (x, y, z) \notin \Omega$ равна:

$$H_x^{(e)}(\mathbf{r}) = H_x^0(\mathbf{r}) - (\mu - 1)ab \left\{ \frac{H_x^{(i)}}{a^2 + u + \sqrt{(a^2 + u)(b^2 + u)}} - \frac{p(u; x, a) [H_x^{(i)} p(u; x, a) + H_y^{(i)} p(u; y, b)]}{[p^2(u; x, a) + p^2(u; y, b)] \sqrt{(a^2 + u)(b^2 + u)}} \right\};$$

$$H_y^{(e)}(\mathbf{r}) = H_y^0(\mathbf{r}) - (\mu - 1)ab \left\{ \frac{H_y^{(i)}}{b^2 + u + \sqrt{(a^2 + u)(b^2 + u)}} - \frac{p(u; y, b) [H_x^{(i)} p(u; x, a) + H_y^{(i)} p(u; y, b)]}{[p^2(u; x, a) + p^2(u; y, b)] \sqrt{(a^2 + u)(b^2 + u)}} \right\}, \quad H_z^{(e)}(\mathbf{r}) = H_z^0(\mathbf{r}),$$

где

$$u := \frac{1}{2} \left[x^2 + y^2 - a^2 - b^2 + \sqrt{(x^2 + y^2 - a^2 - b^2)^2 - 4(a^2 b^2 - x^2 b^2 - y^2 a^2)} \right],$$

$$p(u; x, a) := \frac{x}{a^2 + u}.$$

В случае поперечного внешнего поля эти формулы совпадают с формулами в [12, с. 245], выписанными для этого частного случая. При $a = b = R$ эти формулы переходят в ранее выписанные формулы напряженности поля вне кругового цилиндра.

5. МАГНЕТИК В ФОРМЕ ПРОИЗВОЛЬНОГО ЭЛЛИПСОИДА [4], [17], [11], [12], [20]

Однородный магнетик ($\mu = \text{const}$), занимающий область Ω в форме произвольного эллипсоида с уравнением границы $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$, помещен во внешнее поле с напряженностью $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0(\mathbf{r}), H_y^0(\mathbf{r}), H_z^0(\mathbf{r})\}$, постоянное в области эллипсоида $\mathbf{H}^0(\mathbf{r}) = \{H_x^0, H_y^0, H_z^0\} = \text{const}$, $\mathbf{r} \in \Omega$ (см. рис. 6). Тогда результирующее поле внутри эллипсоида тоже постоянно с напряженностью $\mathbf{H}^{(i)}(\mathbf{r}) = \{H_x^{(i)}, H_y^{(i)}, H_z^{(i)}\}$, где

$$H_x^{(i)} = \frac{H_x^0}{1 + dI(0; a, b, c)}, \quad H_y^{(i)} = \frac{H_y^0}{1 + dI(0; b, a, c)}, \quad H_z^{(i)} = \frac{H_z^0}{1 + dI(0; c, a, b)},$$

а $d := 0,5(\mu - 1)abc$, выражение для

$$I(u; a, b, c) := \int_u^{+\infty} \frac{ds}{(a^2 + s) \sqrt{(a^2 + s)(b^2 + s)(c^2 + s)}}$$

через неполные эллиптические интегралы или элементарные функции (для разных типов соотношения между полуосями эллипсоида) будут приведены ниже. Для случая эллипсоида вращения $a = b \neq c$ эти формулы приводят к тем же выражениям, что и в [17, с. 339], а для шара ($a = b = c$) получаем известную формулу [11, с. 207], [12, с. 245]:

$$\mathbf{H}^{(i)} = \frac{3}{\mu + 2} \mathbf{H}^0, \quad \mathbf{r} \in \Omega.$$

Напряженность поля вне эллипсоида $\mathbf{H}^{(e)}(\mathbf{r}) = \{H_x^{(e)}(\mathbf{r}), H_y^{(e)}(\mathbf{r}), H_z^{(e)}(\mathbf{r})\}$ в точке $\mathbf{r} = (x, y, z) \notin \Omega$ равна:

$$H_x^{(e)}(\mathbf{r}) = H_x^0(\mathbf{r}) - \frac{1}{2}(\mu - 1)abc \left[H_x^{(i)} I(u; a, b, c) - \frac{x}{a^2 + u} Q(u; x, y, z) \right];$$

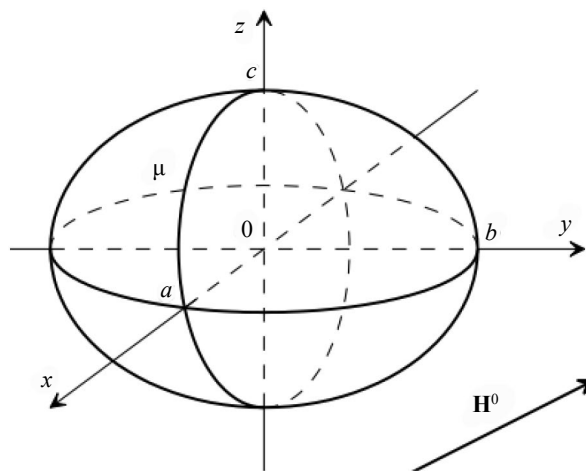


Рис. 6. Эллипсоидальный магнетик.

$$H_y^{(e)}(\mathbf{r}) = H_y^0(\mathbf{r}) - \frac{1}{2}(\mu - 1)abc \left[H_y^{(i)} I(u; b, a, c) - \frac{y}{b^2 + u} Q(u; x, y, z) \right];$$

$$H_z^{(e)}(\mathbf{r}) = H_z^0(\mathbf{r}) - \frac{1}{2}(\mu - 1)abc \left[H_z^{(i)} I(u; c, a, b) - \frac{z}{c^2 + u} Q(u; x, y, z) \right].$$

В этих выражениях

$$Q(u; x, y, z) := \frac{2}{G(u; x, y, z) \sqrt{R(u)}} \left(\frac{x H_x^{(i)}}{a^2 + u} + \frac{y H_y^{(i)}}{b^2 + u} + \frac{z H_z^{(i)}}{c^2 + u} \right),$$

где

$$G(u; x, y, z) := \left(\frac{x}{a^2 + u} \right)^2 + \left(\frac{y}{b^2 + u} \right)^2 + \left(\frac{z}{c^2 + u} \right)^2,$$

$$R(u) := (a^2 + u)(b^2 + u)(c^2 + u).$$

В этих формулах u есть единственный положительный корень уравнения $\frac{x^2}{a^2 + u} + \frac{y^2}{b^2 + u} + \frac{z^2}{c^2 + u} = 1$, которое сводится к кубическому уравнению

$$u^3 + Au^2 + Bu + C = 0,$$

где $A = a^2 + b^2 + c^2 - x^2 - y^2 - z^2$, $B = a^2b^2 + b^2c^2 + a^2c^2 - x^2b^2 - x^2c^2 - y^2a^2 - y^2c^2 - z^2a^2 - z^2b^2$, $C = a^2b^2c^2 - x^2b^2c^2 - y^2a^2c^2 - z^2a^2b^2$.

Это уравнение имеет три действительных корня, из которых только один положительный и который лежит в интервале $(0, x^2 + y^2 + z^2 - \min(a^2, b^2, c^2))$. В случае эллипсоида вращения (две полуоси эллипсоида совпадают) этот корень выражается явно. Если, например, $a = b \neq c$, то ([20, с. 64]):

$$u = \frac{1}{2} \left[x^2 + y^2 + z^2 - a^2 - c^2 + \sqrt{(x^2 + y^2 - z^2 - a^2 + c^2)^2 + 4z^2(x^2 + y^2)} \right].$$

Отметим, что если в эллипсоиде вращения $b = c \neq a$ или $a = c \neq b$, то в этой формуле меняются не только a , b и c , но и соответствующим образом x , y и z . В случае шара радиуса R ($a = b = c = R$) будет $u = x^2 + y^2 + z^2 - R^2$.

Приведем формулы для вычисления $I(u; a, b, c)$, отметив сразу, что $I(u; a, b, c) = I(u; a, c, b)$.

1. Среди чисел a , b и c нет равных. Тогда выражение для $I(u; a, b, c)$ зависит от того, какое из чисел a , b или c стоит на первом месте — наибольшее, среднее или наименьшее. Для определенности считаем $a > b > c$. Тогда:

$$I(u; a, b, c) = \frac{2}{(a^2 - b^2)\sqrt{a^2 - c^2}} [F(\varphi, k) - E(\varphi, k)];$$

$$I(u; b, a, c) = \frac{2\sqrt{a^2 - c^2}}{(a^2 - b^2)(b^2 - c^2)} \left[E(\varphi, k) - \frac{b^2 - c^2}{a^2 - c^2} F(\varphi, k) - \right. \\ \left. - \frac{a^2 - b^2}{\sqrt{a^2 - c^2}} \sqrt{\frac{c^2 + u}{(a^2 + u)(b^2 + u)}} \right];$$

$$I(u; c, a, b) = \frac{2}{(b^2 - c^2)\sqrt{a^2 - c^2}} \left[\sqrt{a^2 - c^2} \sqrt{\frac{b^2 + u}{(a^2 + u)(c^2 + u)}} - E(\varphi, k) \right],$$

где неполные эллиптические интегралы 1 и 2 рода:

$$F(\varphi, k) = \int_0^\varphi \frac{ds}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 s}}, \quad E(\varphi, k) = \int_0^\varphi \sqrt{1 - k^2 \sin^2 s} \, ds,$$

$$\varphi = \arcsin \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{a^2 + u}}, \quad k = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2 - c^2}}.$$

2. Среди чисел a , b и c есть в точности два одинаковых. Тогда выражение для $I(u; a, b, c)$ зависит от того, на каком месте стоит отличный от других параметр и больше ли он двух равных или нет. Для определенности считаем $a = b \neq c$. Тогда в случае $c > a = b$:

$$I(u; a, a, c) = \frac{\sqrt{u + c^2}}{(c^2 - a^2)(u + a^2)} + \frac{1}{2(c^2 - a^2)^{3/2}} \ln \frac{\sqrt{u + c^2} - \sqrt{c^2 - a^2}}{\sqrt{u + c^2} + \sqrt{c^2 - a^2}};$$

$$I(u; c, a, a) = -\frac{2}{(c^2 - a^2)\sqrt{u + c^2}} - \frac{1}{(c^2 - a^2)^{3/2}} \ln \frac{\sqrt{u + c^2} - \sqrt{c^2 - a^2}}{\sqrt{u + c^2} + \sqrt{c^2 - a^2}}.$$

В случае $c < a = b$:

$$I(u; a, a, c) = \frac{1}{(a^2 - c^2)^{3/2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{u + c^2}} - \frac{\sqrt{u + c^2}}{(a^2 - c^2)(u + a^2)};$$

$$I(u; c, a, a) = -\frac{2}{(a^2 - c^2)^{3/2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a^2 - c^2}{u + c^2}} + \frac{2}{(a^2 - c^2)\sqrt{u + c^2}}.$$

3. Если в $I(u; a, b, c)$ будет $a = b = c$, то

$$I(u; a, a, a) = \frac{2}{3(u + a^2)^{3/2}}.$$

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Квант» (“Quantum”) № АААА-А18-118020190095-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. О проблемах использования пакетов универсальных программ для решения задач магнитостатики // Дефектоскопия. 2018. № 11. С. 23—34.

2. Печенков А.Н., Щербинин В.Е. Некоторые прямые и обратные задачи технической магнитостатики. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. 177с.
3. Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике. М.: Наука, 1988. 288 с.
4. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Точные формулы напряженности магнитного поля внутри и вне однородного эллипсоидального магнетика во внешнем однородном в области магнетика поле // Дефектоскопия. 2022. № 2. С. 51—63.
5. Нетребко Н.В., Николаев И.П., Полякова М.С., Шмальгаузен В.И. Электричество и магнетизм. М.: Изд-во ВМиК МГУ, 2006, 327 с.
6. Меледин Г.В., Черкасский В.С. Электродинамика в задачах. Часть 1. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2003. 227 с.
7. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Применение основного уравнения магнитостатики к задачам магнитной толщинометрии. Часть 2. // Дефектоскопия. 2014. № 10. С. 3—17.
8. Гречко Л.Г., Сугаков В.И., Томасевич О.Ф., Федорченко А.М. Сборник задач по теоретической физике. М.: Высшая школа, 1984, 319 с.
9. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Обратная задача магнитостатики в полях насыщения // Дефектоскопия. 2019. № 10. С. 35—44.
10. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983. 463 с.
11. Татур Т.А. Основы теории электромагнитного поля. М.: Высшая школа, 1989. 271 с.
12. Неразрушающий контроль и диагностика / Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 487 с.
13. Антонов Л.И., Деденко Л.Г., Матвеев А.Н. Методика решения задач по электричеству. М.: Изд-во МГУ, 1982. 168 с.
14. Дякин В.В. Математические основы классической магнитостатики. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2016. 403 с.
15. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Один подход к решению основного уравнения магнитостатики для случая неоднородных магнетиков // Теоретическая и математическая физика. 2016. Т. 187. № 1. С. 88—103.
16. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. К решению задачи магнитостатики в случае зависимости магнитной проницаемости от координат // Дефектоскопия. 2015. № 9. С. 38—48.
17. Ахиезер А.И. Общая физика. Электрические и магнитные явления. Киев: Наукова думка, 1981. 471 с.
18. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Расчет напряженности магнитного поля внутри и вне бесконечного цилиндра, помещенного в произвольное внешнее поле // Дефектоскопия. 2024. № 3. С. 33—46.
19. Дякин В.В., Кудряшова О.В., Раевский В.Я. Расчет напряженности магнитного поля от полу-бесконечного цилиндра, помещенного в произвольное внешнее поле // Дефектоскопия. 2023. № 5. С. 32—44.
20. Хижняк Н.А. Интегральные уравнения макроскопической электродинамики. Киев: Наукова думка, 1986. 279 с.

REFERENCES

1. Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevskij V.Ya. O problemah ispol'zovaniya paketov universal'nyh programm dlya resheniya zadach magnitostatiki // Defektoskopiya. 2018. № 11. P. 23—34.
2. Pechenkov A.N., Shcherbinin V.E. Nekotorye pryamyie i obratnye zadachi tekhnicheskoy magnitostatiki. Ekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 2004. 177 p.
3. Savel'ev I.V. Sbornik voprosov i zadach po obshchej fizike. M.: Nauka, 1988. 288 p.
4. Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevskij V.Ya. Tochnye formuly napryazhennosti magnitnogo polya vnutri i vne odnorodnogo ellipsoidal'nogo magnetika vo vneshnem odnorodnom v oblasti magnetika pole // Defektoskopiya. 2022. № 2. P. 51—63.
5. Netrebko N.V., Nikolaev I.P., Polyakova M.S., Shmal'gauzen V.I. Elektrichestvo i magnetizm. M.: Izd-vo VMiK MGU, 2006. 327 p.
6. Meledin G.V., Cherkasskij V.S. Elektrodinamika v zadachah. Chast' 1. Novosibirsk: Izd. NGU, 2003, 227 p.
7. Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevskij V.Ya. Primenenie osnovnogo uravneniya magnitostatiki k zadacham magnitnoj tolshchinometrii. Chast' 2. // Defektoskopiya. 2014. № 10. P. 3—17.
8. Grechko L.G., Sugakov V.I., Tomasevich O.F., Fedorchenko A.M. Sbornik zadach po teoreticheskoy fizike. M.: Vysshaya shkola, 1984. 319 p.
9. Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevskij V.Ya. Obratnaya zadacha magnitostatiki v polyah nasyscheniya // Defektoskopiya. 2019. № 10. P. 35—44.
10. Matveev A.N. Elektrichestvo i magnetizm. M.: Vysshaya shkola, 1983. 463 p.
11. Tatur T.A. Osnovy teorii elektromagnitnogo polya. M.: Vysshaya shkola, 1989. 271 p.
12. Nerazrushayushchij kontrol' i diagnostika. Pod red. Klyueva V.V. M.: Mashinostroyeniye, 1995. 487 p.
13. Antonov L.I., Dedenko L.G., Matveev A.N. Metodika resheniya zadach po elektrichestvu. M.: Izd-vo MGU, 1982. 168 p.

14. *Dyakin V.V.* Matematicheskie osnovy klassicheskoy magnitostatiki. Ekaterinburg: RIO UrO RAN, 2016. 403 p.
 15. *Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevskij V.Ya.* Odin podhod k resheniyu osnovnogo uravneniya magnitostatiki dlya sluchaya neodnorodnyh magnetikov // *Teoreticheskaya i matematicheskaya fizika*. 2016. T. 187. № 1. P. 88—103.
 16. *Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevskij V.Ya.* K resheniyu zadachi magnitostatiki v sluchae zavisimosti magnitnoj pronicaemosti ot koordinat // *Defektoskopiya*. 2015. № 9. P. 38—48.
 17. *Ahiezer A.I.* Obshchaya fizika. Elektricheskie i magnitnye yavleniya. Kiev: Naukova dumka, 1981. 471 p.
 18. *Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevskij V.Ya.* Raschet napryazhennosti magnitnogo polya vnutri i vne beskonechnogo cilindra, pomeshchennogo v proizvol'noe vneshnee pole // *Defektoskopiya*. 2024. № 3. P. 33—46.
 19. *Dyakin V.V., Kudryashova O.V., Raevskij V.Ya.* Raschet napryazhennosti magnitnogo polya ot polubeskonechnogo cilindra, pomeshchennogo v proizvol'noe vneshnee pole // *Defektoskopiya*. 2023. № 5. P. 32—44.
 20. *Hizhnyak N.A.* Integral'nye uravneniya makroskopicheskoy elektrodinamiki. Kiev: Naukova dumka, 1986. 279 p.
-

ДИАГНОСТИКА СКРЫТОЙ ВОДЫ В СОТОВЫХ ПАНЕЛЯХ СТЕКЛОПЛАСТИК—NOMEX ПРИ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ОРИЕНТАЦИИ ПАНЕЛЕЙ

© 2024 г. С.М. Magoda¹, T.N. Ngonda¹, В.П. Вавилов^{2,*}, Д.Ю. Кладов²

¹*Mechanical Engineering Department, Cape Peninsula University of Technology,
P.O. Box 1906, Bellville, 7535 Cape Town, South Africa*

² *Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634050 Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: * vavilov@tpu.ru*

Поступила в редакцию 31.05.2024; после доработки 14.06.2024
Принята к публикации 21.06.2024

Представлены результаты экспериментального и численного анализа процедуры обнаружения воды в авиационных сотовых конструкциях. Проникновение атмосферной влаги в соты авиационных панелей может приводить как к незначительным, так и существенным повреждениям элементов самолетов, в которых использованы сотовые конструкции. Процент заполнения сот водой или льдом является важным фактором, влияющим на возможные повреждения сотовой панели. В настоящем исследовании акцент сделан на анализ следующих параметров: 1) ориентация панели в пространстве (горизонтальная, вертикальная или под наклоном 30, 45 и 60°), что влияет на эффективность обнаружения воды, в особенности в незаполненных сотах; 2) оптимальные способы нагрева в режиме активного теплового контроля; 3) влияние фазового перехода лед/вода на эффективность выявления воды. Численный анализ проводили с использованием программы ThermoCalc-3D, что позволило оценить качество диагностики воды в самолетных панелях различной ориентации. Испытания контрольных образцов, содержащих в сотах воду и лед, были выполнены с использованием ряда алгоритмов обработки термограмм, реализованных в программе ThermoFit, что позволило повысить отношение сигнал/шум при диагностике изменяющейся массы воды в панелях с различной пространственной ориентацией, в том числе при наличии фазового перехода лед/вода.

Keywords: тепловой неразрушающий контроль, влагосодержание, обработка изображений, дифференциальный температурный сигнал, температурный контраст.

EVALUATING WATER INGRESS IN GLASS FIBER PLASTIC/NOMEX HONEYCOMB PANELS UNDER VARYING PANEL ORIENTATION

© 2024 С.М. Magoda¹, T.N. Ngonda¹, V.P. Vavilov^{2,*}, D. Yu. Klodov²

¹*Mechanical Engineering Department, Cape Peninsula University of Technology,
P.O. Box 1906, Bellville, 7535 Cape Town, South Africa*

² *National Research Tomsk Polytechnic University, Russia 634050 Tomsk, Lenin av., 30
E-mail: * vavilov@tpu.ru*

The paper presents the results of experimental and numerical investigations on water ingress trapped in aircraft honeycomb panels. The ingress of atmospheric water during aircraft service may cause minor or major damages of airplane crucial components. The percentage of water/ice filling honeycomb cells is an important factor related to possible cell damage. This study is focused on the analysis of the following inspection parameters: 1) influence of panel orientation (horizontal, vertical and Inclined at 30, 45 and 60°) on the efficiency of water detection, 2) efficiency and optimization of a heating technique in evaluating water ingress, 3) influence of water/ice phase transformation on detectability of water ingress.

The numerical analysis was conducted by using the ThermoCalc-3D software in order to evaluate the detectability of water ingress in the cases where a test panel is placed in different spatial orientations. The samples with water and ice were tested and analysed by using several data processing algorithms available in the ThermoFit software to enhance water detection performance. The signal-to-noise ratio concept was used to compare efficiency of image processing algorithms in the inspection of water ingress in honeycomb panels with varying water content, spatial orientation and water/ice phase transformation.

Keywords: thermal nondestructive testing, water ingress, image processing, differential temperature signal, temperature contrast.

DOI: 10.31857/S0130308224070038

1. ВВЕДЕНИЕ

Сотовые панели являются ключевым элементом авиационных конструкций в современных самолетах. В течение многих лет такие панели используются при производстве фюзеляжей, крыльев, рулей высоты и направления, т.е. тех компонентов, где требуется высокая прочность

при малой массе. Отдельные сотовые изделия соединяются в готовые конструкции, эксплуатируемые длительное время в неблагоприятных атмосферных условиях. В процессе эксплуатации возможно проникновение влаги через неплотные соединения сотовых конструкций вследствие дождя, конденсации и т.п. На крейсерской высоте скрытая вода замерзает и расширяется, что может приводить как к незначительному, так и существенному разрушению сотовых панелей с фатальными последствиями. Весьма опасными с точки зрения эксплуатационной надежности самолетов являются циклы замерзания/таяния воды, скрытой в сотах, при чередующихся взлетах и посадках самолетов.

Известен ряд методов неразрушающего контроля (НК), пригодных с той или иной степенью эффективности для обнаружения и оценки массы воды в авиационных сотовых панелях. Ультразвуковой НК может рассматриваться в качестве одного из основных методов, однако его недостатками являются необходимость контакта с объектом контроля, низкая производительность и трудности испытаний тонких конструкций [1—3]. К другим методам диагностики скрытой воды относится техника магнитного резонанса, которая доказала свою высокую чувствительность при обнаружении скрытой воды. Этот метод используют для локализации воды в ячейках сотовых панелей при одностороннем доступе к объекту контроля [4]. Был разработан органокерамический композит, содержащий электропроводный компаунд, внедренный в гидрофильную матрицу [5]. При взаимодействии воды и композита электропроводность существенно изменяется вследствие поглощения и расширения материала матрицы. Микроволновой НК также используют в ближней зоне для обнаружения, идентификации и количественной оценки воды [6]. На основе того факта, что амплитуда отраженных микроволн, измеряемая коаксиальным датчиком, пропорциональна массе воды, предложен так называемый метод характеристического пика (characteristic peak method — CPM), основанный на линейном сканировании объекта контроля и позволяющий оценить размеры зоны влагосодержания. Однако вышеописанные методы также являются контактными и пригодны для одноразового контроля зон малой площади. На фоне недостатков многих известных методов НК применительно к контролю воды в сотах перспективным является пассивный и активный тепловой контроль (ТК) или метод инфракрасной (ИК) термографии. Данный метод характеризуется дистанционным характером, иллюстративностью и высокой производительностью испытаний [7—17].

Для иллюстрации применения ТК для проверки воды в эксплуатируемых самолетах на рис. 1 показаны результаты, ранее полученные в Томском политехническом университете в пассивной и активной процедурах испытаний.

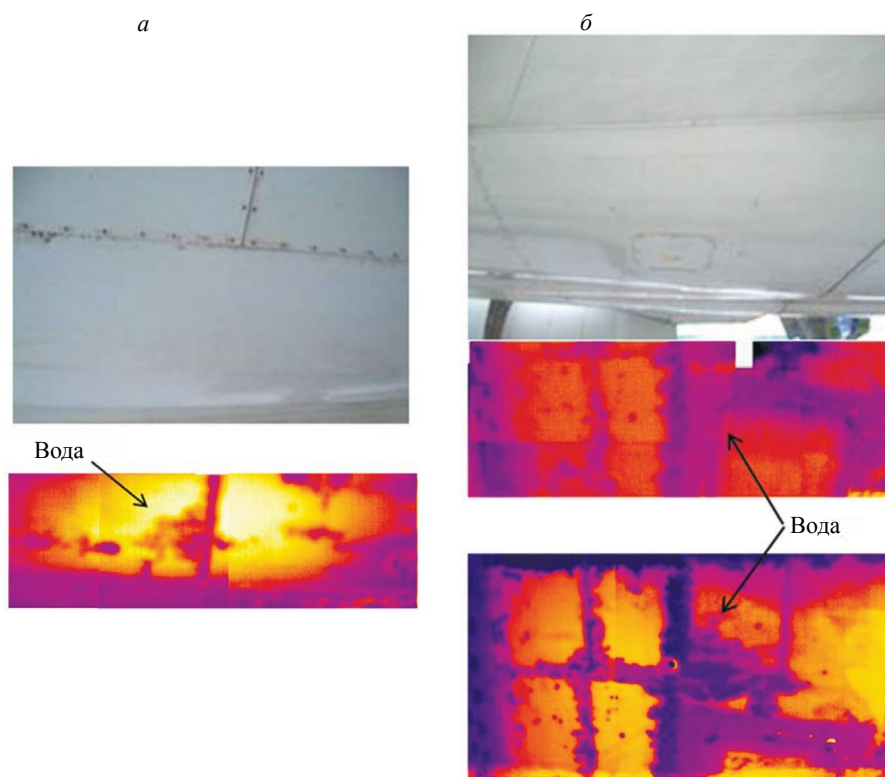


Рис. 1. Диагностика воды в фюзеляже самолета (с разрешения Д.А. Нестерука, ТПУ): *а* — после посадки; *б* — после посадки (термограмма сверху) и через 3 ч в режиме обдува горячим воздухом.

Обследование проводили утром с 9-00 до 12-00 (посадка самолета была произведена в 8-20). Согласно предложенной в Томском политехническом университете методике, обнаружение воды с массой, представляющей практический интерес, возможно непосредственно после посадки самолета (рис. 1а). Тем не менее, зоны с низким влагосодержанием могут быть подчеркнуты, применяя внешнюю тепловую стимуляцию (рис. 1б).

Хроническим недостатком ранее предложенных методик, в том числе используемых в корпорациях Boeing и Airbus, является качественный характер испытаний. Ряд подходов к количественной оценке воды в сотах были рассмотрены в [9, 10, 14, 17]. Фактически, предлагалось определять площадь температурной аномалии и умножать ее на высоту сот в предположении, что вода заполняет 100 % объема сот. На практике это не всегда так, и наличие воздушных зазоров между скрытой водой и обшивкой сот может существенно влиять на оценки массы воды.

Ранее было проанализировано влияние воздушного зазора на параметры обнаружения воды в горизонтально-ориентированных панелях, в результате чего были продемонстрированы возможности искусственной нейронной сети для оценки массы воды [11]. В настоящей работе теоретически и экспериментально исследовано, как частичное заполнение сот водой влияет на поверхностное температурное распределение при горизонтальном, вертикальном и наклонном положении сотовой панели, включая анализ фазового перехода лед/вода.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1. Тестовые сценарии

Моделирование сотовых панелей представляет определенные трудности вследствие их сравнительно сложной структуры, особенно при необходимости моделировать дефекты сот. Предложен ряд моделей обнаружения и оценки массы воды [9, 11, 14]. Фактически, моделирование задач ТК началось с разработки одномерных моделей, в которых передача тепла происходит по одной координате. В таких моделях дифференциальные температурные сигналы на поверхности зависят от глубины структурных неоднородностей, изменяясь во времени. Одномерные модели эффективны в случае однородных объектов контроля, и их аналитические решения становятся громоздкими для многослойных объектов. Следующим шагом при моделировании задач ТК было использование решений уравнения теплопроводности в цилиндрической двухмерной геометрии, в частности, при анализе дискообразных дефектов в изделии типа диска (программа ThermoCalc-2D, Томский политехнический университет).

В настоящее время развитое моделирование в ТК осуществляют путем анализа трехмерной теплопроводности в слоистых структурах с дефектами конечных размеров. Например, программа ThermoCalc-3D (Томский политехнический университет) позволяет моделировать до 36 анизотропных слоев различных материалов, в которых можно размещать до 40 дефектов в форме параллелепипеда. Обе программы ThermoCalc-2D и ThermoCalc-3D используют неявную разностную схему, причем количество узлов численной сетки может достигать нескольких миллионов.

В настоящей работе рассмотрены различные сценарии, описывающие положение воды в сотах. Анализируемая модель включает сотовую структуру, состоящую из ячеек, выполненных из бумаги типа Nomex, и стеклопластиковой обшивки. Поскольку в эксплуатируемых самолетах сотовые панели, используемые в фюзеляже, крыльях, рулях высоты и направления, ориентированы в пространстве различным образом, исследовались ситуации горизонтального, вертикального и наклонного положения объектов контроля в пространстве.

Ячейки сот могут быть полностью (рис. 2а) или частично (рис. 2б—д) заполнены водой (см. рис. 2а). На рис. 2 показаны ситуации, в которых ячейки сот заполнены водой на 50 и 100 %. В работе [11] было показано, что воду можно эффективно обнаруживать в ситуациях, когда она находится в контакте с обшивкой, и диагностика становится затруднительной, если между обшивкой и водой имеется воздушный промежуток. Следует заметить, что вода может в определенных положениях панели ускорять деградацию бумаги Nomex. В наклонном положении (см. рис. 2д, е) часть обшивки и часть ячейки находятся в контакте с водой под действием сил гравитации. Это приводит к тому, что температурные параметры обнаружения воды, такие как дифференциальный температурный сигнал ΔT , текущий контраст $C = \Delta T / T_{nd}$ (T_{nd} — избыточная температура объекта контроля в бездефектной области), а также оптимальные времена их наблюдения ($t_m(\Delta T)$ и $t_m(C)$), будут отличаться от случая горизонтальной панели с 50 %-м заполнением ячеек водой. Рассмотренные ниже модели включают ситуации НК воды в горизонтальном (см. рис. 2а—в), вертикальном (см. рис. 2г) и наклонном (см. рис. 2д, е) положениях сотовой панели.

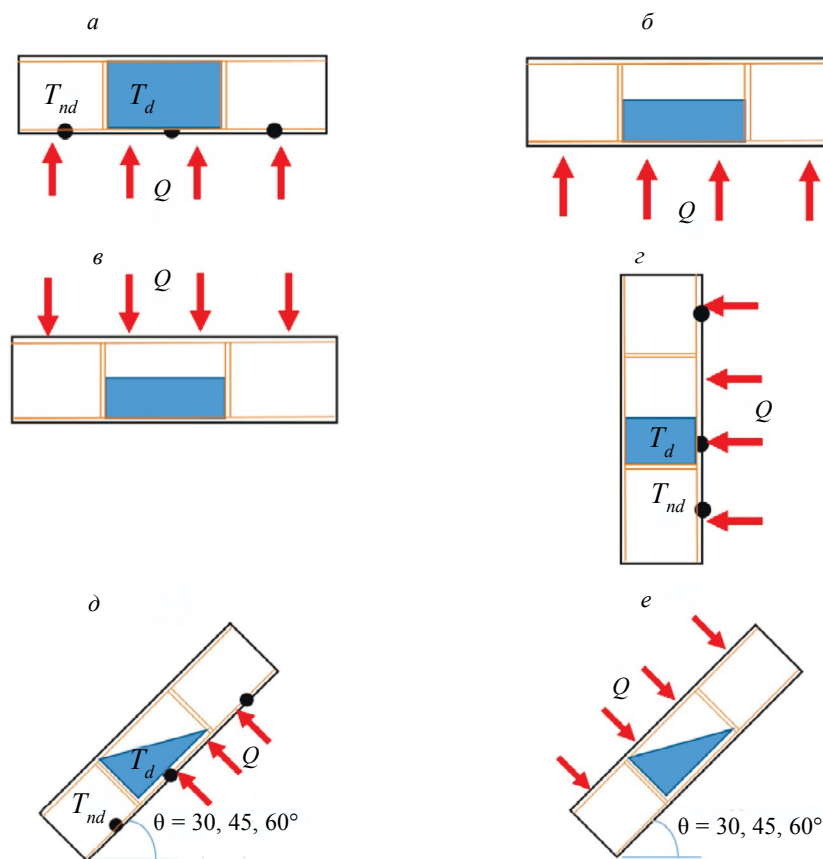


Рис. 2. 3D-численные модели воды в сотах (программа ThermoCalc 3D): *a* — 100 % воды; *б* — 50 %; *в* — 50 %, контроль сбоку; *г* — 100 %, вертикальная панель; *д* — 50 %, наклонная панель контроль снизу; *е* — 50 %, наклонная панель, контроль сверху.

Таблица 1

Теплофизические свойства материалов

Материал	Теплопроводность, Вт · м ⁻¹ · К ⁻¹	Плотность, кг · м ⁻³	Теплоемкость, Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹	Температуропроводность, м ² · с ⁻¹	Тепловая инерция, Втм ^{1/2} · м ⁻² · К ⁻¹
Стеклопластик	1,1	1300	1775	$1,30 \times 10^{-7}$	832
Вода	0,61	1000	1005	$1,41 \times 10^{-7}$	1573
Бумага Nomex	0,17	128	830	$1,82 \times 10^{-7}$	769
Воздух (в тонких прослойках)	0,07	27,3	928	$5,8 \times 10^{-5}$	9,192

Основные параметры модели во всех сценариях были следующие: толщина стеклопластиковой обшивки 0,5 мм, материал ячеек — бумага Nomex, высота ячеек — 10 мм, мощность нагрева — 50 кВт · м⁻², время нагрева — 0,5 с, шаг расчета 0,1 с. Следует заметить, что выбранные параметры нагрева эквивалентны практическому случаю импульсного нагрева в течение 25 мс оптическим излучением мощностью 1 МВт · м⁻², и изменение этих параметров обусловлено необходимостью выбора временного шага сетки по времени для исследования теплового процесса в течение длительного времени. Теплофизические свойства материалов приведены в табл. 1. При моделировании был введен аддитивный шум амплитудой 100 мК («трехсигмовый» предел при шуме ИК детектора со стандартным отклонением около 30 мК) и мультипликативный шум с амплитудой 1—5 % (соответствует поверхностным шумам неметаллов). В ряде случаев моделировали также неравномерный (гауссовский) по пространству нагрев. Примеры изменения температурных сигналов ΔT и контрастов C во времени представлены на рис. 3 для всех сценариев: горизонтального (100 и 50 % воды), вертикального (50 %), наклонного (50 %), а также для случая неравномерного нагрева. Заметим, что, как и во многих предыдущих исследованиях, сигнал ΔT

определен как разность температур в дефектной (T_d) и бездефектной (T_{nd}) точках. Во всех сценариях эти точки выбирали в центре соответствующих зон, для наклонной панели — в точках центра (см. рис. 2а, з, д). Оптимальные (максимальные) величины вышеупомянутых параметров контроля приведены ниже в табл. 2 для различных тестовых сценариев.

2.2. Результаты моделирования и анализ

Анализировали изменение во времени избыточной температуры панели в области ячеек, занятых водой. Результаты зависят от ориентации панели, массы воды и поверхности, которая нагревается внешним тепловым потоком. Очевидно, что при контакте скрытой воды с обшивкой сот, изменение поверхностной температуры незначительно по сравнению с нагревом «сухих» участков, а также сот, в которых вода отделена от обшивки воздушным промежутком. Это обусловлено высоким тепловым сопротивлением воздушных промежутков, а также высокой теплоемкостью воды, что препятствует как ее быстрому нагреву, так и охлаждению. Ячейки сот, заполненные водой на 100 % (вода в контакте с обшивкой на обеих поверхностях), характеризуются большими максимальными сигналами $\Delta T_m(C_m)$ и более короткими временами их появления t_m . Такая же ситуация имеет место при вертикальном положении панели, где вода заполняет ячейки на 50 %, но по-прежнему находится в контакте с обшивкой с двух сторон панели. Ранее сообщалось, что время оптимального наблюдения сокращается для меньших масс воды; кроме того, присутствие воздушного промежутка делает величины C_m и t_m существенно зависимыми от массы воды. В то же время, если имеет место контакт воды с обшивкой, то влияние толщины слоя воды, т.е. массы воды, сравнительно невелико [11].

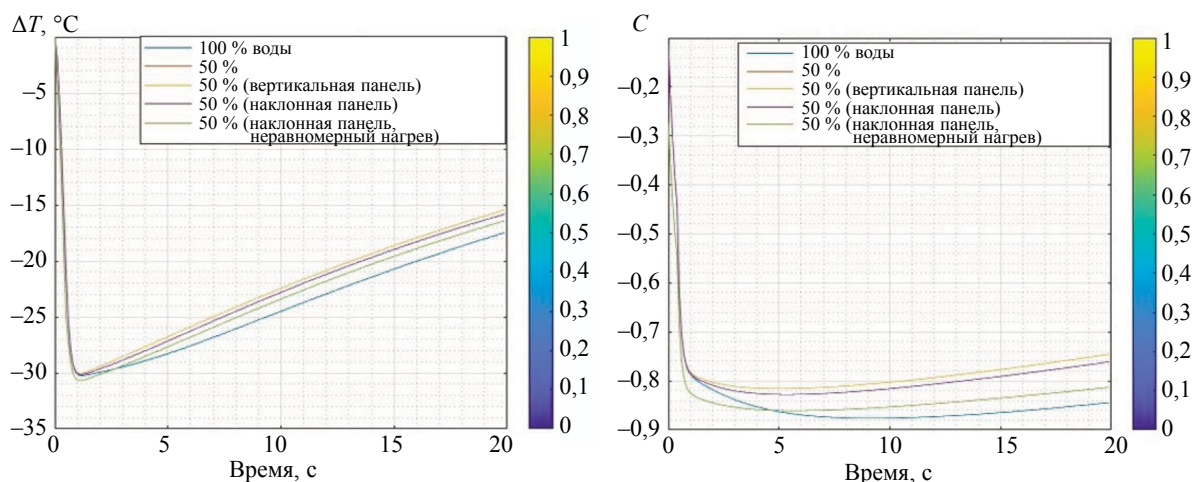


Рис. 3. Изменение ΔT и C во времени.

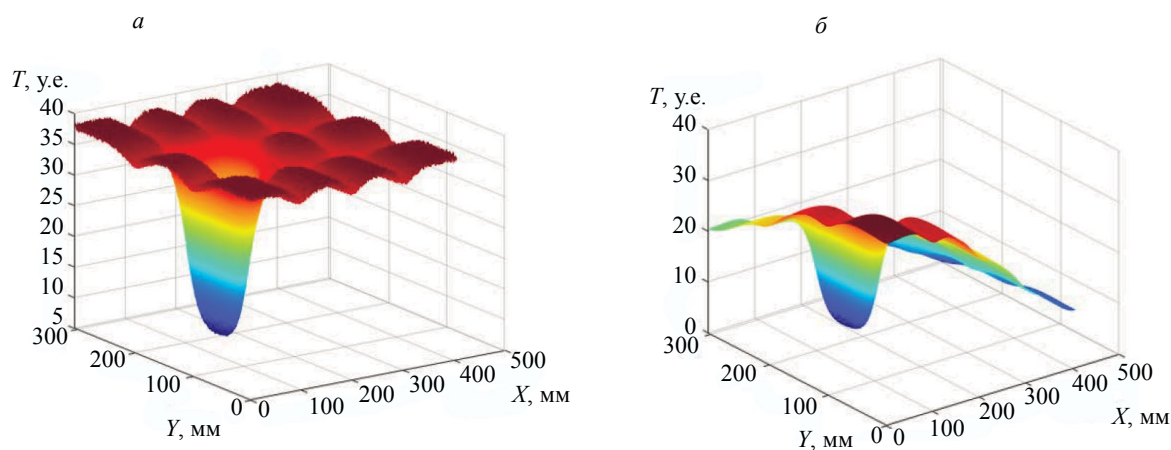


Рис. 4. 3D-распределения температуры в момент максимального сигнала ΔT_m (50 % воды в наклонной панели): а — равномерный нагрев; б — неравномерный нагрев.

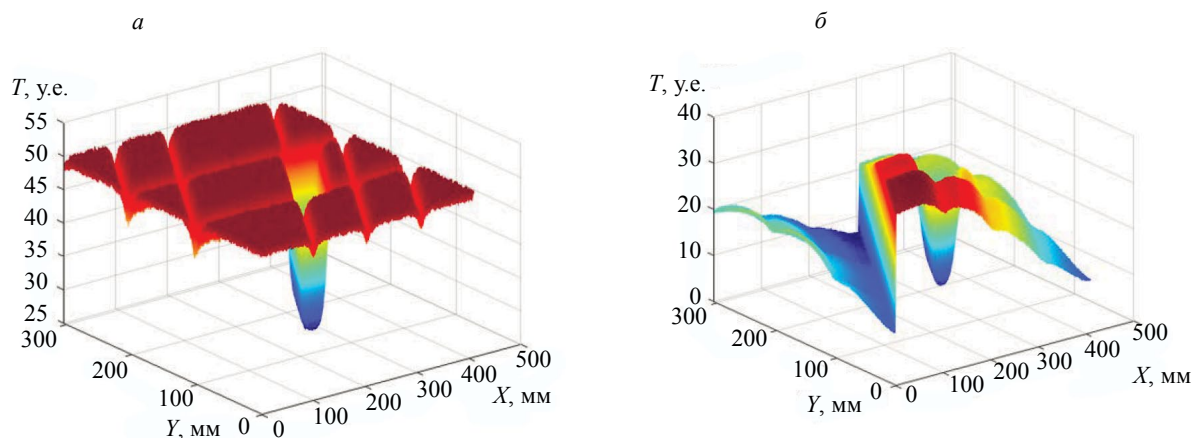


Рис. 5. 3D-распределения температуры в момент максимального сигнала ΔT_m (50 % воды в вертикальной панели): *а* — равномерный нагрев; *б* — неравномерный нагрев.

Рис. 3 показывает изменение ΔT и C во времени для всех сценариев, а рис. 4 и 5 представляют 3D-распределения поверхностной температуры для ряда сценариев (наклонная и вертикальная панели). Следует заметить, что в силу определения параметров контроля величины дифференциальных сигналов и контрастов являются отрицательными, т.е. температура над ячейками с водой ниже температуры бездефектных зон; ниже знак «минус» будет опущен.

Представленные результаты моделирования отражают идеальные случаи ТК благодаря хорошо определенным входным данным. Они также хорошо иллюстрируют физический принцип обнаружения воды в сотах, состоящий в том, что участки с водой при нагреве и в начальный период охлаждения панели характеризуются более низкой температурой по сравнению с бездефектными участками. Разница температур этих участков ΔT_m достигает экстремума в определенный момент времени t_m . Максимальные сигналы ΔT_m появляются раньше, чем соответствующие максимальные контрасты C_m , причем обе величины выше для сот с большей массой воды. Следует отметить, что во всех сценариях, если вода контактирует с обшивкой, ΔT сигналы появляются и достигают максимума раньше, чем при наличии воздушного промежутка между водой и обшивкой. Как и ожидалось, в случае вертикальной панели время оптимального наблюдения близко к случаю горизонтальной панели (5,1 с). Наличие воздушного промежутка снижает сигналы ΔT и затягивает время оптимального обнаружения. В целом, моделирование предсказывает, что воду в сотах можно обнаружить и при наличии воздушного промежутка. Тем не менее, чем толще слой воздуха, тем выше его тепловое сопротивление, и тем хуже условия обнаружения воды.

В табл. 2 приведены результаты моделирования для всех критических параметров, связанных с обнаружением воды в сотах при импульсном нагреве (0,1 с). При 100 %-заполнении сот водой на нагреваемой поверхности имеют место максимальные величины дифференциального сигнала (30,3 °C) и температурного контраста (88 %). Этот случай характеризуется самым коротким временем наблюдения (1,2 с) и таким образом обеспечивает наилучшие условия обнаружения воды. Самые низкие величины сигнала (3 °C) и контраста (14 %) возникают на поверхности горизонтальной панели с 50 %-м заполнением водой при контроле через воздушный промежуток.

Заметим, что в случае наклонной и вертикальной панели с 50 % воды в сотах время достижения максимального контраста короче (5,1 и 5,5 с соответственно) по сравнению со 100 %-заполнением ячеек водой (9,3 с).

В целом, если вода контактирует с обшивкой, температурные контрасты достигают максимальных величин (до 1, т.е. 100 %) при коротких временах контроля, иными словами, ячейки со 100 % воды требуют меньшего времени контроля по сравнению с незаполненными ячейками. Еще раз подчеркнем, что существенные температурные контрасты возникают благодаря высокой теплоемкости воды. Для нагрева воды в ячейках требуется длительное время, и вода сохраняет свою температуру также в течение значительного времени.

Таблица 2

Оптимальные параметры ТК воды (стеклопластиковые соты, результаты моделирования,
 $t_h = 0,5$ с, $Q = 50$ кВт · м⁻²)

Scenario	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}$	$t_m(\Delta T_m), \text{с}$	C_m	$t_m(C_m), \text{с}$
Ячейка в горизонтальной панели (100 % воды)	30,3*	1,2	0,88	9,3
Воздушный промежуток				
Ячейка в горизонтальной панели (50 % воды)	3,0	13,5	0,14	20
Ячейка в вертикальной панели (50 % воды)	30,0	1,4	0,82	5,1
Ячейка в наклонной панели (50 % воды)	30,1	1,8	0,83	5,5
Ячейка в наклонной панели (50 % воды) при неравномерном нагреве	28,1	1,5	0,86	5,8
Вода в контакте с обшивкой				
Ячейка в горизонтальной панели (50 % воды)	2,9	20	1	1,3
Ячейка в вертикальной панели (50 % воды)	30,0	1,4	0,82	5,1
Ячейка в наклонной панели (50 % воды)	2,8	20	1,0	1,3
Ячейка в наклонной панели (50 % воды) при неравномерном нагреве	1,4	20	1,0	1,4

* Знак «минус» опущен для ΔT_m и C_m .

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Контрольные образцы и аппаратура

Как и при моделировании, эксперименты проводили на четырех контрольных образцах, состоявших из бумажных (Nomex) гексагональных сот с поперечным размером 10 мм и стеклопластиковой обшивки (см. теплофизические свойства материалов в табл. 1). Четыре слоя стеклопластика были уложены в обшивку по схеме 0°/90°. Испытания образцов с частичным заполнением водой и изменением их ориентации было нетривиальной задачей. Три сессии экспериментов были выполнены на 70 ячейках, заполненных водой на 100, 50 и 25 %. Двадцать ячеек в одном из образцов были открыты и заполнены водой также на 100, 50 и 25%, чтобы проанализировать влияние капиллярных сил на внутренних поверхностях ячеек при изменении наклона образцов. Следует заметить, что бумага ячеек частично абсорбировала воду, поэтому эксперименты проводили непосредственно после инъекции воды (рис. 6). Блестящий стеклопластик обладает сравнительно низким коэффициентом излучения (0,6), будучи слегка прозрачным как для ИК-излучения, так и для видимого света. Для повышения коэффициента излучения на поверхность образцов наносили самоклеющуюся ПВХ пленку с коэффициентом излучения 0,96.

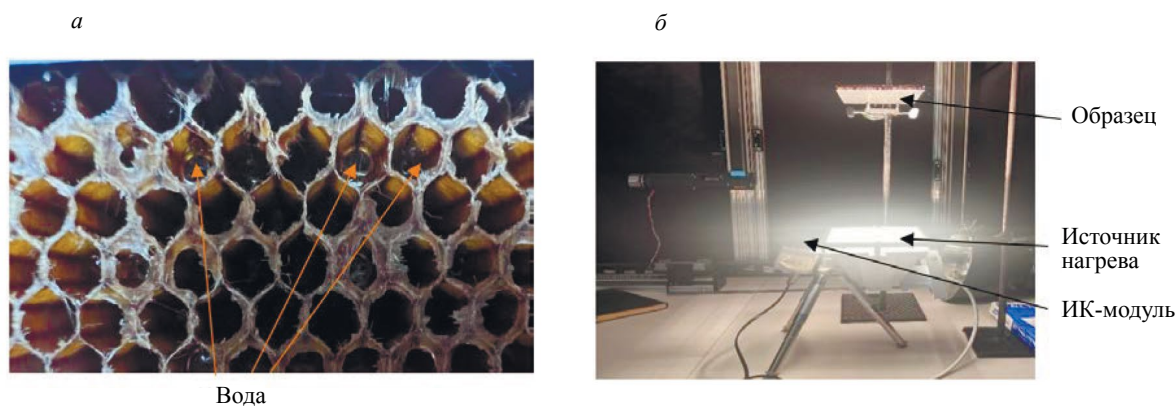


Рис. 6. Ячейки сот с водой (а) и экспериментальная установка (б).

Для тепловой стимуляции применяли три вида источников нагрева: 1) импульсную ксеноновую лампу (энергия 1,5 кДж в импульсе длительностью 5 мс); 2) галогенную лампу (мощность 0,5 кВт, длительность нагрева 5 с); 3) воздушный фен (мощность 3 кВт). Следует заметить, что корпорация Airbus использует для нагрева панелей самолетов контактное «тепловое одеяло» [14].

Температурное поле образцов регистрировали с помощью тепловизионного модуля Optiris PI 450i (формат изображения 382×288 , температурная чувствительность 40 мК, спектральный диапазон 7,5—13 мкм, см. рис. 6). Последовательности из 1000 ИК термограмм записывали с частотой 1 Гц, после чего обрабатывали с помощью программы ThermoFit (ТПУ).

3.2. Выбор оптимального вида нагрева

Первая экспериментальная сессия была выполнена с целью определить оптимальный источник нагрева. В качестве критерия сравнения вариантов ТК было выбрано отношение сигнал/шум (SNR), определенное стандартным образом как отношение разности усредненных температур в дефектной и бездефектной зонах к стандартному отклонению температуры в бездефектной зоне. Обе зоны выбирал оператор, сохраняя их конфигурацию для всех сравниваемых вариантов ТК (см. ниже). Основываясь на данных табл. 3, видно, что максимальную величину $\text{SNR}=39,6$ при температурном сигнале $4,38^\circ\text{C}$ обеспечила галогенная лампа (такие лампы часто применяют в тепловых дефектоскопах). При этом тепловой контраст (69 %) был ниже, чем в случае импульсного оптического и мощного кратковременного воздушного нагрева. Это подтверждает известный вывод в теории ТК о том, что максимальные контрасты создаются импульсной стимуляцией, но при этом поглощенная энергия может быть сравнительно низкой. В дальнейшем был использован галогенный источник, как создававший максимальные температурные сигналы.

Таблица 3

Параметры ТК воды при использовании различных источников нагрева

Источник нагрева	SNR	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}$	C_m
Галогенная лампа	39,6	4,38	0,69
Импульсная ксеноновая лампа	21,7	1,34	0,81
Воздушный фен	22,5	1,26	0,87

Вторая сессия экспериментов была посвящена определению максимальных величин ΔT , C и времен их наблюдения путем анализа различных сценариев и ориентаций образца в горизонтальном, вертикальном и наклонном (30° , 45° и 60°) положении. С использованием той же аппаратуры был исследован случай фазового перехода, т.е. таяния льда. В этом случае применяли как активную, так и пассивную ИК-термографию.

3.3. Экспериментальные результаты и дискуссия

В большинстве экспериментов применяли одну галогеновую лампу мощностью 0,5 кВт в качестве источника нагрева в течение 5 с. Как отмечено выше, импульсная ксеноновая лампа и фен создавали более низкие температурные сигналы, особенно на сотах с 25 % воды, при существенной неравномерности нагрева.

Табл. 4 содержит экспериментальные результаты в случае ячеек с различным содержанием воды.

При контроле сот с заполнением водой 50 % (D2) и 25 % (D1) нагрев осуществляли на поверхности обшивки, отделенной от воды воздушным промежутком. Пример исходной термограммы показан на рис. 7а, а изменение поверхностной температуры во времени для трех характерных точек приведено на рис. 7б (очевидно, что в случае 100 % воды воздушный промежуток отсутствовал). Максимальная избыточная температура в конце нагрева составила $8,7^\circ\text{C}$. С целью подавить одинопиксельный шум все термограммы были сглажены маской 5×5 .

В начале теплового процесса избыточная температура образцов близка к нулю, и чтобы избежать деления на ноль при вычислении контраста несколько первых изображений были исключены из обработки данных.

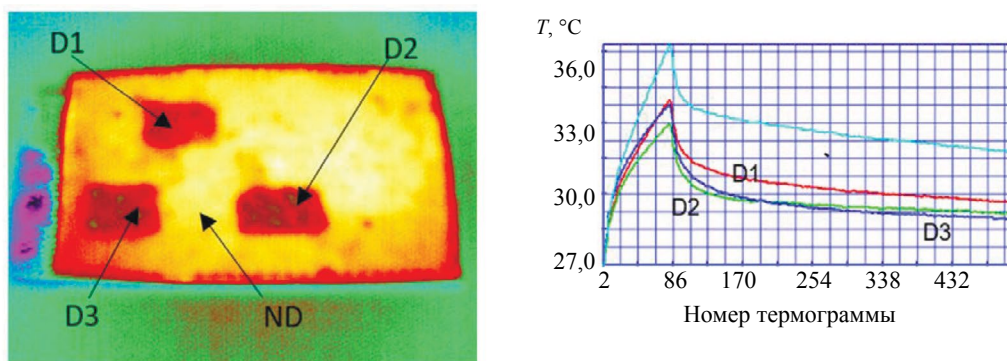


Рис. 7. Исходная ИК-термограмма и изменение поверхностной температуры во времени (горизонтальная панель с воздушными зазорами).

Таблица 4

Оптимальные параметры ТК (эксперимент, горизонтальная панель с воздушными зазорами)

Дефект	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}$	$t_m(\Delta T_m), \text{с}$	C_m	$t_m(C_m), \text{с}$
25 % (D1)	2,7	11,6	0,45	27,4
50 % (D2)	3,4	15,6	0,55	9,8
100 % (D3)	3,5	8,8	0,64	24,8

Экспериментальные результаты в табл. 4 в значительной степени совпадают с теоретическими данными для тех же самых положений образца (180° с воздушным промежутком). Очевидно, что соты со 100 % воды характеризуются максимальным температурным сигналом ΔT ($3,54^\circ\text{C}$) при минимальном времени наблюдения (8,8 с), а также максимальным контрастом C (64,1 %) при более длительном времени наблюдения (24,8 с). Как и ожидалось, температурные сигналы над ячейками, заполненных на 100 % водой, возникают раньше, чем в случае воздушных промежутков. По-иному ведет себя температурный контраст, достигая максимума при более поздних временах.

На рис. 8а приведены исходные графики температуры в характерных точках поверхности. Те же самые профили на рис. 8б были получены после нормализации термограмм в последовательности на термограмму, соответствующую окончанию нагрева (5 с); величина $T_{\text{отн}}$ выражена в относительных единицах. Видно, что нормализация, являющаяся известным приемом улучшения результатов ТК, подчеркивает дифференциальные сигналы ΔT , которые сохраняются в течение длительного времени.

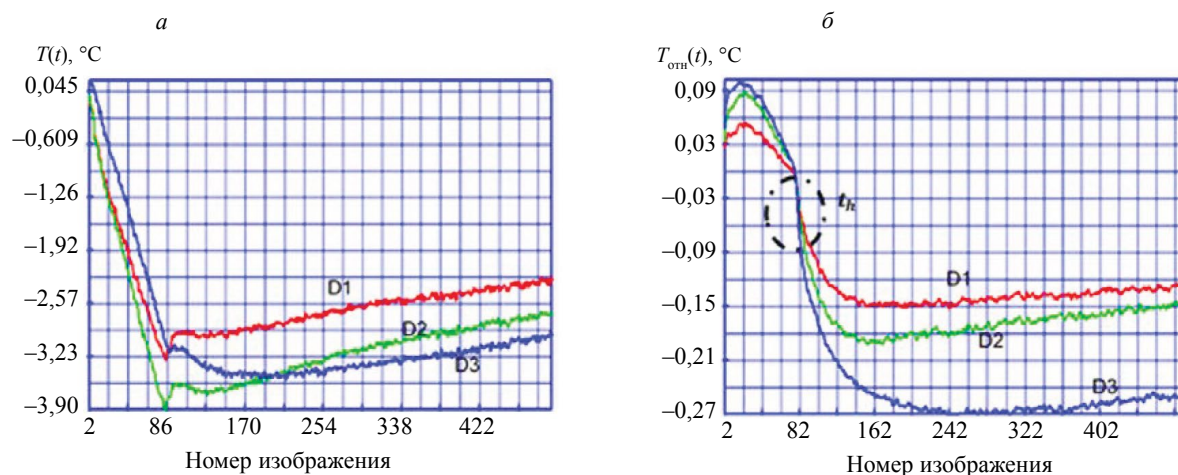


Рис. 8. Графики изменения температуры в характерных точках (D1, D2, D3): а — исходные данные; б — после нормализации на момент окончания нагрева.

Таблица 5

Результаты обработки термограмм (горизонтальная панель)

Изображение	SNR (оптимальное время наблюдения)		
	D1 (25 %)	D2 (50 %)	D3 (100 %)
Исходное	9,8 (4,6 с)	10,1 (4,9 с)	10,4 (5,3 с)
Фазограмма Фурье	69,9 (4 ^я гармоника)	88,1 (4 ^я гармоника)	77,1 (4 ^я гармоника)
МАГК*	9,7 (1 ^я компонента)	9,2 (1 ^я компонента)	9,7 (1 ^я компонента)
Коррелограмма	24,9	16,2	18,7

* МАГК – метод анализа главных компонент.

С целью улучшить индикации от ячеек, наполненных водой, последовательность исходных термограмм была обработана с помощью ряда алгоритмов, включенных в программу ThermoFit Pro, причем критерием сравнения также служило отношение SNR. Результаты обработки термограмм приведены в табл. 5.

Аналогичным образом образец размещали в наклонном положении (30 и 60°). При наклоне 30° температура в бездефектных зонах в конце нагрева достигала 10 °С. Результаты ниже представлены для длительности нагрева 5 с. Исходные термограммы в последовательности были усреднены по четырем последовательным термограммам с целью снизить высокочастотные шумы и сократить количество изображений в исходной последовательности. Оптимальные параметры контроля приведены в табл. 6, а табл. 7 и 8 содержат результаты для угла наклона 60° и вертикальной ориентации соответственно.

Таблица 6

Результаты обработки термограмм (наклон 30°, воздушный промежуток)

Изображение	SNR		
	D1	D2	D3
Исходное	5,0 (29,5 с)	6,5 (29,3 с)	8,3 (29,5 с)
Фазограмма Фурье	9,0 (3 ^я гармоника)	13,3 (3 ^я гармоника)	48,5 (3 ^я гармоника)
МАГК	4,5 (1 ^я компонента)	5,2 (1 ^я компонента))	5,9 (1 ^я компонента)
Коррелограмма	4,8	5,6	6,3

Таблица 7

Результаты обработки термограмм (наклон 60°, воздушный промежуток)

Изображение	SNR		
	D1	D2	D3
Исходное	7,4 (31,3 с)	6,5 (31,3 с)	7,4 (31,3 с)
Фазограмма Фурье	16,8 (5 ^я гармоника)	21,9 (5 ^я гармоника)	26,2 (5 ^я гармоника)
МАГК	5,5 (1 ^я компонента)	5,4 (1 ^я компонента)	5,8 (1 ^я компонента)
Коррелограмма	5,0	5,0	5,4

Таблица 8

Результаты обработки термограмм (вертикальная панель, воздушный промежуток)

Изображение	SNR		
	D1	D2	D3
Исходное	5,2 (31,3 с)	6,3 (31,3 с)	7,4 (31,3 с)
Фазограмма Фурье	17,5 (5 ^я гармоника)	20,2 (5 ^я гармоника)	50,3 (5 ^я гармоника)
МАГК	4,2 (1 ^я компонента)	4,9 (1 ^я компонента)	5,3 (1 ^я компонента)
Коррелограмма	3,9	4,5	5,0

Таблица 9

Эффективность алгоритмов обработки термограмм при различных ориентациях образца в пространстве

Ориентация образца	SNR (заполнение водой 50 %)			
	Исходная термограмма	Фазограмма Фурье	МАГК	Коррелограмма
Горизонтальная	10,1	88,1	9,2	16,2
30°	6,5	13,3	5,2	5,6
60°	6,5	21,9	5,4	5,0
Вертикальная	6,3	20,2	4,9	4,5

В табл. 9 приведены для сравнения величины SNR для различных ориентаций образца. В целом, наилучшая «видность» зон с водой была достигнута при горизонтальной ориентации для всех алгоритмов обработки данных. Образцы с наклоном 30 и 60° характеризовались сравнительно низкими SNR, что может быть объяснено протечками воды через стенки бумажных ячеек при повороте образца. Соответственно, вертикально-ориентированный образец также создавал низкую величину SNR при худшем визуальном восприятии дефектных зон. Также следует отметить, что не существует одного алгоритма анализа термограмм, который обеспечивал бы наилучшие результаты для всех сценариев ТК.

На термограммах рис. 9а, б видно, что при ориентации образца под углом 60° «отпечатки» воды в зоне дефектов D1 и D2 имеют иную конфигурацию по сравнению с вертикальной ориентацией. Как отмечено выше, по-видимому это происходит из-за протечек воды через стенки сот в зоне склейки сот с обшивкой. Поэтому дефектные зоны D1 и D2 с частичным заполнением ячеек водой приобретают искаженную форму что приводит к более низким величинам SNR (см. табл. 5—7).

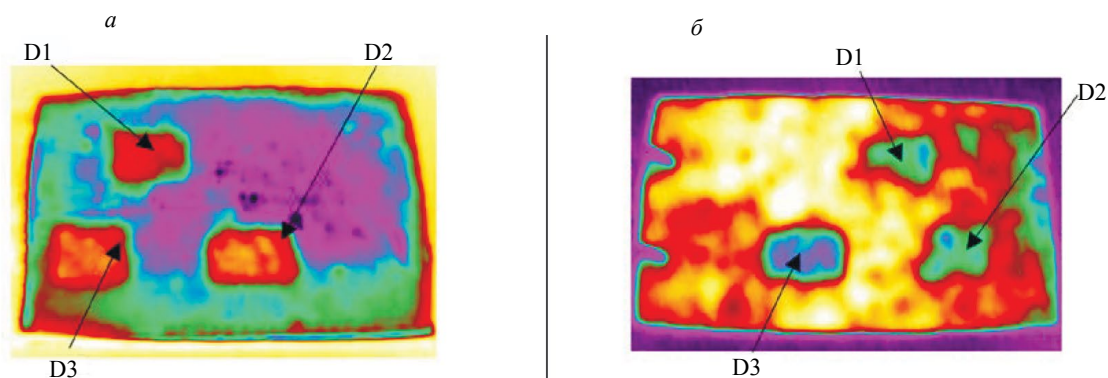


Рис. 9. Термограммы образца в различной ориентации: а — горизонтальная (180°); б — наклонная (60°).

3.4. Фазовый переход лед/вода

Как отмечено выше, вода в сотовых панелях самолетов на высоте крейсерского полета замерзает и расширяется в объеме. В процессе и после посадки происходит нагрев самолета и таяние льда при температуре окружающего воздуха выше 0 °С. Процесс фазового перехода является критическим, сопровождаясь постоянной температурой поверхности в течение некоторого периода времени, когда часть поступающей энергии расходуется на фазовый переход. При этом возникают высокие величины ΔT и C при коротких временах наблюдения t_m . В настоящем исследовании как активная, так и пассивная процедуры ТК были применены для анализа фазового перехода лед/вода.

Экспериментальная процедура заключалась в замораживании воды в сотовых панелях при температуре –20 °С в течение двух суток при заполнении ячеек водой на 100, 50 и 25 %. Затем образец размещали в зону теплового контроля с температурой окружающей среды 22 °С и регистрировали динамику изменения поверхностной температуры во времени с помощью тепловизора Optiris PI 450.

Следующий эксперимент проводили на аналогичном образце (25, 50 и 100 % воды), который нагревали галогенной лампой мощностью 0,5 кВт в течение 2 мин, после чего исследовали про-

Таблица 10

Эффективность алгоритмов обработки результатов активного и пассивного ТК воды в случае фазового перехода лед/вода

Процедура ТК	Алгоритм обработки	SNR		
		25 %	50 %	100 %
Пассивная	Корреляция	30,2	37,4	50,2
	Производная по времени	4,8	5,3	5,8
	Фурье-анализ	27	28,2	75,8
	МАГК	108,8	114,4	143,1
Активная	Корреляция	1,46	1,74	9,5
	Производная по времени	3,54	5,83	10,9
	Полиномиальная аппроксимация	3,71	5,9	38,3
	Фурье-анализ	3,47	5,52	28,9
	МАГК	5,39	7,94	44,82

Таблица 11

Оптимальные температурные параметры обнаружения воды в сотах при активном и пассивном ТК в случае фазового перехода лед/вода

Процедура ТК	$\Delta T_m, ^\circ\text{C}$			C_m		
	25 %	50 %	100 %	25 %	50 %	100 %
Активная	17,53	21,43	26,52	0,37	0,48	0,53
Пассивная	10,14	10,65	10,72	0,47	0,47	0,47

цесс охлаждения в течение 30 мин. Результаты, представленные в табл. 10, показывают, что максимальные величины SNR наблюдались в зонах со 100 % воды в случаях как пассивного, так и активного ТК, табл. 11 содержит оптимальные параметры ТК (ΔT_m и C_m) для обеих процедур, иллюстрируя преимущество активного ТК. Рис. 10а показывает соответствующую термограмму, а графики изменения температурного сигнала и контраста во времени приведены на рис. 10б—г.

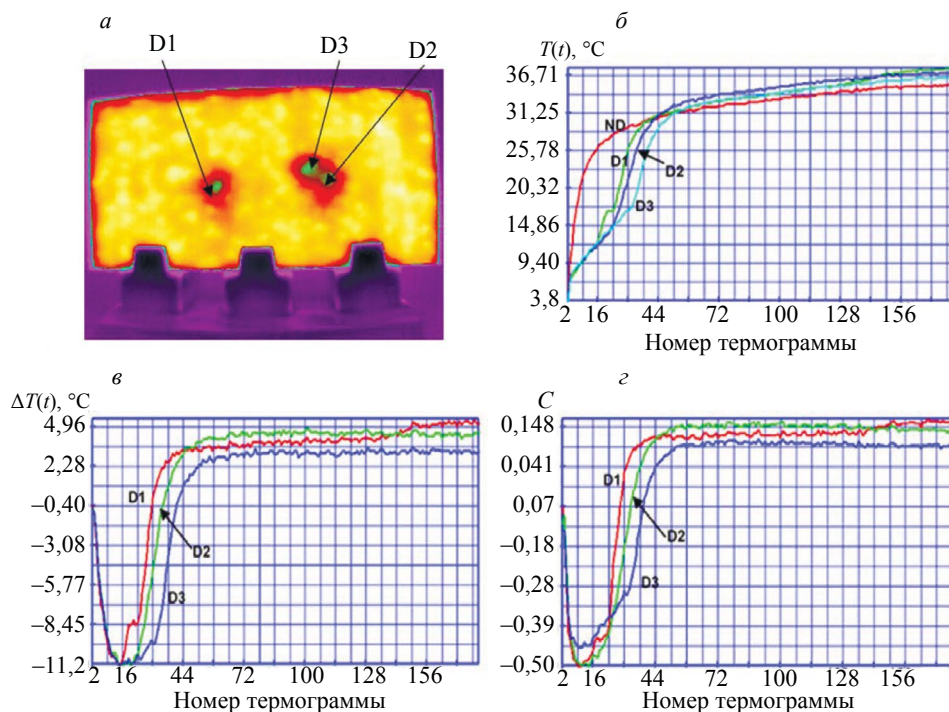


Рис. 10. Активный ТК воды в сотах в случае фазового перехода лед/вода (D1: 25 %; D2: 50 %; D3: 100 %; ND — без-дефектная зона): а — исходная термограмма; б — температура; в — температурный сигнал; г — температурный контраст.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Своевременное обнаружение воды в авиационных сотовых панелях является типичной и важной задачей диагностики эксплуатируемых самолетов. Трехмерное моделирование соответствующих задач ТК воды в сотах является эффективным методом количественной оценки процедур неразрушающих испытаний. В настоящем исследовании выполнено сравнительная оценка критериев обнаружения воды, а именно, отношения сигнал/шум, дифференциальных температурных сигналов и контрастов, а также их времен наблюдения, для различных сценариев ТК, включающих горизонтальное, вертикальное и наклонное положения контролируемых панелей. Сделаны следующие выводы.

– Экспериментально установлено, что ориентация панели несущественно влияет на величину SNR. Иными словами, эффективность обнаружения воды слабо зависит от ориентации самолетной панели в процессе диагностики самолета.

– Нет единого алгоритма обработки результатов ТК, обеспечивающего оптимальные результаты во всех процедурах испытаний.

– Результаты настоящего исследования находятся в хорошем согласии с данными более ранних работ, показывающими, что наиболее эффективно диагностируются лед/вода, находящиеся в контакте с контролируемой обшивкой сотовой панели.

– Применение надлежащей техники тепловой стимуляции сотовых панелей является критическим для обеспечения оптимальных условий ТК.

– Феномен увеличения объема воды в сотах при замерзании, что может вызвать разрушение ячеек, требует дальнейших исследований.

Настоящее исследование было поддержано грантом Российского научного фонда (РНФ) № 22-19-00103.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Maldague X.* Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. USA: John Wiley & Sons, New York, 2001. 682 p.
2. Non-destructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing (3rd ed.). USA: ASNT, 2001. 718 p.
3. *Kaplan H.* Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. Tutorial Texts in Optical Engineering. SPIE Press. V. TT34. 1999. USA. 164 p.
4. *LaPlante G., Marble A.E., MacMillan B., Lee-Sullivan P., Colpitts B.G., Balcom B.J.* Detection of water ingress in composite sandwich structures: a magnetic resonance approach // NDT & E International. 2005. V. 38. Is. 6. P. 501—507. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.01.006
5. *Pfeiffer H., Heer P., Ioannis Pitropakis Pyka G., Greet Kerckhofs Patitsa M., Wevers M.* Liquid detection in confined aircraft structures based on lyotropic percolation thresholds // Sensors and actuators. B. Chemical. 2012. V. 161. Is. 1. P. 791—798. DOI: 10.1016/j.snb.2011.11.034
6. *Wang P., Pei Y., Zhou L.* Near-field microwave identification and quantitative evaluation of liquid ingress in honeycomb sandwich structures // NDT & E international. 2016. V. 83. P. 32—37. DOI: 10.1016/j.ndteint.2016.06.002
7. *Ibarra-Castanedo C., Genest M., Servais P., Maldague X.P.V., Bendada A.* Qualitative and quantitative assessment of aerospace structures by pulsed thermography // Nondestructive Testing and Evaluation. 2007. V. 22 (2—3). P. 199—215. DOI: 10.1080/10589750701448548
8. *Katunin A., Dragan K., Dziendzikowski M.* Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques // Composite Structures. 2015. V. 127. P. 1—9. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.080
9. *Vavilov V., Marinetti S., Pan Y., Chulkov A.* Detecting water ingress in aviation honeycomb panels: Qualitative and quantitative aspects // Polymer Testing. 2016. V. 54. P. 270—280. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.07.023
10. *Chulkov A.O., Shagdirov B.I., Vavilov V.P., Kladov D.Yu., Stasevskii V.I.* Detecting and evaluating water ingress in horizontally-oriented aviation honeycomb panels by using automated thermal nondestructive testing // Rus. J. NDT. 2023. V. 59. No. 12. P. 1272—1279. DOI: 10.1134/S1061830923600946
11. *Ibarra-Castanedo C., Brault L., Genest M., Farley V., Maldague X.P.V.* Detection and characterization of water ingress in honeycomb structures by passive and active infrared thermography using a high resolution camera / Proc. 11th Int. Conf. Quant. InfraRed Thermogr, Naples, 2012. DOI: 10.21611/qirt.2012.278
12. *Нестерук Д.А.* Тепловой неразрушающий контроль воды в авиационных сотовых панелях эксплуатируемых самолетов / Канд. дисс. Томск: Томский политехнический университет, 2005.
13. *Пань Янян.* Количественна оценка влагосодержания в композиционных сотовых панелях эксплуатируемых самолетов с помощью инфракрасной термографии / Канд. дисс. Томск: Томский политехнический университет, 2018.
14. Airbus develops infra-red water detector. Flight Global, 1995. <https://www.flightglobal.com/airbus-develops-infra-red-water-detector/16622.article>

15. Airbus Adopts Infrared Thermography for In-service Inspection // Insight. October 1994. V. 36. No. 10.
16. Vavilov V., Klimov A. Advanced Modeling of Thermal NDT Problems From Buried Landmines to Defects in Composites // Proc. of SPIE «Thermosense XXIV». 2002. V. 4710. P. 507—521.
17. Shrestha R., Choi M., Kim W. Thermographic inspection of water ingress in composite honeycomb sandwich structure: a quantitative comparison among Lock-in thermography algorithms // Quant. InfraRed Thermography J. 2019. V. 18. No. 2. P. 1—16.

REFERENCES

1. Maldague X. Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. USA: John Wiley & Sons, New York, 2001. 682 p.
2. Non-destructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing (3rd ed.). USA: ASNT, 2001. 718 p.
3. Kaplan H. Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment. Tutorial Texts in Optical Engineering. SPIE Press. V. TT34. 1999. USA. 164 p.
4. LaPlante G., Marble A.E., MacMillan B., Lee-Sullivan P., Colpitts B.G., Balcom B.J. Detection of water ingress in composite sandwich structures: a magnetic resonance approach // NDT & E International. 2005. V. 38. Is. 6. P. 501—507. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.01.006
5. Pfeiffer H., Heer P., Ioannis Pitropakis Pyka G., Greet Kerckhofs Patitsa M., Wevers M. Liquid detection in confined aircraft structures based on lyotropic percolation thresholds // Sensors and actuators. B. Chemical. 2012. V. 161. Is. 1. P. 791—798. DOI: 10.1016/j.snb.2011.11.034
6. Wang P., Pei Y., Zhou L. Near-field microwave identification and quantitative evaluation of liquid ingress in honeycomb sandwich structures // NDT & E international. 2016. V. 83. P. 32—37. DOI: 10.1016/j.ndteint.2016.06.002
7. Ibarra-Castaneda C., Genest M., Servais P., Maldague X.P.V., Bendada A. Qualitative and quantitative assessment of aerospace structures by pulsed thermography // Nondestructive Testing and Evaluation. 2007. V. 22 (2—3). P. 199—215. DOI: 10.1080/10589750701448548
8. Katunin A., Dragan K., Dziendzikowski M. Damage identification in aircraft composite structures: A case study using various non-destructive testing techniques // Composite Structures. 2015. V. 127. P. 1—9. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.080
9. Vavilov V., Marinetti S., Pan Y., Chulkov A. Detecting water ingress in aviation honeycomb panels: Qualitative and quantitative aspects // Polymer Testing. 2016. V. 54. P. 270—280. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2016.07.023
10. Chulkov A.O., Shagdirov B.I., Vavilov V.P., Kladov D.Yu., Stasevskii V.I. Detecting and evaluating water ingress in horizontally-oriented aviation honeycomb panels by using automated thermal nondestructive testing // Rus. J. NDT. 2023. V. 59. No. 12. P. 1272—1279. DOI: 10.1134/S1061830923600946
11. Ibarra-Castaneda C., Brault L., Genest M., Farley V., Maldague X.P.V. Detection and characterization of water ingress in honeycomb structures by passive and active infrared thermography using a high resolution camera / Proc. 11th Int. Conf. Quant. InfraRed Thermogr, Naples, 2012. DOI: 10.21611/qirt.2012.278
12. Nesteruk D.A. Thermal imaging control of water in aviation cellular panels during aircraft operation / Cand. Sci. (Eng.) Dissertation. Russia. Tomsk: Tomsk Polytech. Univ., 2005.
13. Pan' Yanyan. Quantitative assessment of moisture content in composite honeycomb panels of operated aircraft by infrared thermography / Cand. Sci. (Eng.) Dissertation. Russia. Tomsk: Tomsk Polytech. Univ., 2018.
14. Airbus develops infra-red water detector. Flight Global, 1995. <https://www.flightglobal.com/airbus-develops-infra-red-water-detector/16622.article>
15. Airbus Adopts Infrared Thermography for In-service Inspection // Insight. October 1994. V. 36. No. 10.
16. Vavilov V., Klimov A. Advanced Modeling of Thermal NDT Problems From Buried Landmines to Defects in Composites // Proc. of SPIE «Thermosense XXIV». 2002. V. 4710. P. 507—521.
17. Shrestha R., Choi M., Kim W. Thermographic inspection of water ingress in composite honeycomb sandwich structure: a quantitative comparison among Lock-in thermography algorithms // Quant. InfraRed Thermography J. 2019. V. 18. No. 2. P. 1—16.

ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ: КЛАССИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ

© 2024 г. С.Е. Черных^{1,*}, В.П. Вавилов^{2,**}, В.Н. Костин^{1,***}, Ю.И. Комоликов^{1,****},
Д.Ю. Кладов^{2,*****}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,

Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7

E-mail: *suo@mail.ru; **vavilov@tpu.ru; ***kostin@imp.uran.ru; ****yikom@yandex.ru;

*****dyk10@tpu.ru

Поступила в редакцию 31.05.2024; после доработки 14.06.2024

Принята к публикации 14.06.2024

Рассмотрены виды дефектов и пути их образования при производстве плиток из корундовой керамики. Методом активного теплового неразрушающего контроля с применением оптического нагрева исследована целостность плиток, содержащих искусственные дефекты. Применены схемы одно- и двухстороннего теплового контроля, а также различные способы программной обработки термограмм. Установлено, что наилучшие результаты по выявлению внутренних дефектов в керамических плитках толщиной 10 мм при тепловой стимуляции с помощью галогенных ламп дает метод одностороннего теплового контроля.

Ключевые слова: керамика, композит, дефектоскопия, термография, тепловой контроль.

THERMAL TESTING OF CORUNDUM CERAMICS: CLASSICAL TECHNIQUES FOR OPTICAL HEATING

© 2024 S.E. Chernykh^{1,*}, V.P. Vavilov^{2,**}, V.N. Kostin^{1,***}, Yu.I. Komolikov^{1,****},
D.Yu. Kladov^{2,*****}

¹Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,

Russia 620108 Yekaterinburg

²National Research Tomsk Polytechnic University, Russia 634028 Tomsk

E-mail: *suo@mail.ru; **vavilov@tpu.ru; ***kostin@imp.uran.ru; ****yikom@yandex.ru;

*****dyk10@tpu.ru

The types of defects and ways of their formation in the production of tiles from corundum ceramics are considered. The integrity of tiles containing artificial defects has been investigated by the method of active thermal non-destructive testing using optical heating. Single- and double-sided thermal control schemes are applied, as well as various methods of software processing of thermograms. It has been established that the best results in detecting internal defects in ceramic tiles with a thickness of 10 mm during thermal stimulation using halogen lamps are obtained by the method of unilateral thermal testing.

Keywords: ceramics, composite, flaw detection, thermography, thermal testing.

DOI: 10.31857/S0130308224070049

ВВЕДЕНИЕ

Существует два основных вида керамики — кислородосодержащая и бескислородная (карбиды, нитриды), есть промежуточные виды (оксикарбонитриды, оксинитриды и т. п.) и керамокомпозиты. В общем виде кислородосодержащая керамика от бескислородной существенно отличается технологией изготовления (карбиды, нитриды — это горячее прессование) и в большинстве — показателем теплопроводности на один-два порядка [1]. Из кислородосодержащих керамик наибольшее распространение для промышленных применений имеет корундовая керамика, имеющая наивысшие показатели твердости, прочности и химстойкости при минимальной цене. По объему использования в качестве функционального керамического материала корунд превосходит любой другой керамический материал в десятки раз. Технология оксидной керамики традиционная и универсальна для всех видов изделий (кирпичи, плитки для пола и стен, бронеплитки и т. п.). В различных видах керамики могут возникать дефекты одного и того же типа. В классическом производстве может осуществляться как визуальный контроль, так и выборочный разрушающий контроль образца из партии [2].

Корундовая керамическая ударопрочная, износостойкая и химически стойкая плитка широко применяется в различных отраслях промышленности, в военной и медицинской технике. Керамические оксидные плитки используются для защиты оборудования от износа и химического разрушения при футеровке осадительных центрифуг, предназначенных для концентрации радиоактивных отходов [3, 4]. В композиционной броне для защиты живой силы и военной технике также используются керамические элементы, изготавливаемые в виде плиток [5]. Существует множество примеров экстремального использования корундовых керамических плиток, где особое внимание уделяется качеству, так как в этих условиях любой дефект может привести к катастрофическим последствиям. Функциональные керамические плитки могут быть изготовлены из материала различного состава и иметь предварительно спроектированные стандартные и нестандартные размеры и формы. Основные процессы формования при изготовлении керамических плиток — полусухое прессование и шликерное литье в пористые формы. Весь технологический процесс изготовления керамических плиток, включающий подготовку сырья, формование, сушку и обжиг, отличается возможностью полной автоматизации [6].

Однако формование изделий из керамических порошков осложняется их низкой текучестью, плохим заполнением форм, трудностью удаления воздуха из порошков и шликера. В результате в процессе производства керамической плитки могут возникать следующие дефекты:

1) неравномерная усадка и нарушение правильной геометрии, а также трещины и раковины, наблюдаемые при обжиге плиток;

2) образование скрытых и поверхностных трещин или полное растрескивание плитки;

3) вздутия или раковины внутри изделия;

4) дефекты, сопровождаемые расслоениями и раковинами на поверхности изделия.

Также возможно появление физико-химических дефектов, таких как неоднородность фазового и химического состава [7].

Неразрушающий контроль керамики может проводиться следующими методами: контроль проникающими веществами, ультразвуковой контроль, рентгенография, акустическая эмиссия, лазерная ультразвуковая диагностика, визуально-измерительный контроль, включая машинное зрение, а также инфракрасная термография [8]. На данный момент работы по тепловому контролю корундовой керамики практически отсутствуют. Авторы считают, что данное направление требует развития, в частности при неразрушающем контроле готовых изделий с заданными свойствами. В предыдущей работе авторов [9] установлено, что для обнаружения внутренних дефектов в керамических пластинах может быть использован активный тепловой неразрушающий контроль. Этот способ успешно можно проецировать на все виды плоских изделий из оксидной керамики (циркониевой, магнезиальной, мулитовой, кварцевой и т. д.).

В настоящей работе исследован активный тепловой контроль с использованием оптической стимуляции образцов [10], где представлены результаты исследования плиток из корундовой керамики с внутренними искусственными дефектами типа раковина, поскольку такие дефекты визуально не обнаруживаются, но представляют наибольшую угрозу. В качестве источника нагрева применяли галогенные лампы. Использовалась программная обработка полученных термограмм [11] с применением таких процедур, как фурье-преобразование и вейвлет-анализ.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных вещества для изготовления образцов использовали оксид алюминия (Al_2O_3) с содержанием спекающей добавки на основе MnO_2 . Образцы для исследования в форме плиток $55 \times 55 \times 10$ мм (рис. 1) изготавливали методом шликерного литья в гипсовые формы. После извлечения из формы их сушили и подвергали предварительному обжигу при температуре 1100°C для достижения минимальной механической прочности. Для физико-механических исследований из заготовок вырезали прямоугольные образцы $10 \times 10 \times 40$ мм. В плитках формировали искусственные дефекты. Подготовленные плитки и образцы проходили окончательный совместный обжиг в атмосфере воздуха при 1550°C в течение 2 ч.

Величину твердости керамических образцов, H_v , измеряли с использованием автоматизированной системы FISCHERScope HM2000 HYm при нагрузке 250 г. Для обработки результатов измерений использовали среднее арифметическое из двух измерений. Предел прочности на изгиб определяли на установке «Instron-1185». Открытую пористость, $P_{\text{отк}} (\%)$, определяли по ГОСТ 2409—2014. Плотность спеченных образцов (ρ) определяли методом гидростатического взвешивания по методике ГОСТ 2409—2014, жидкость насыщения — вода. Относительную плотность образцов рассчитывали, исходя из теоретических плотностей компонентов в соответствующих концентрациях.

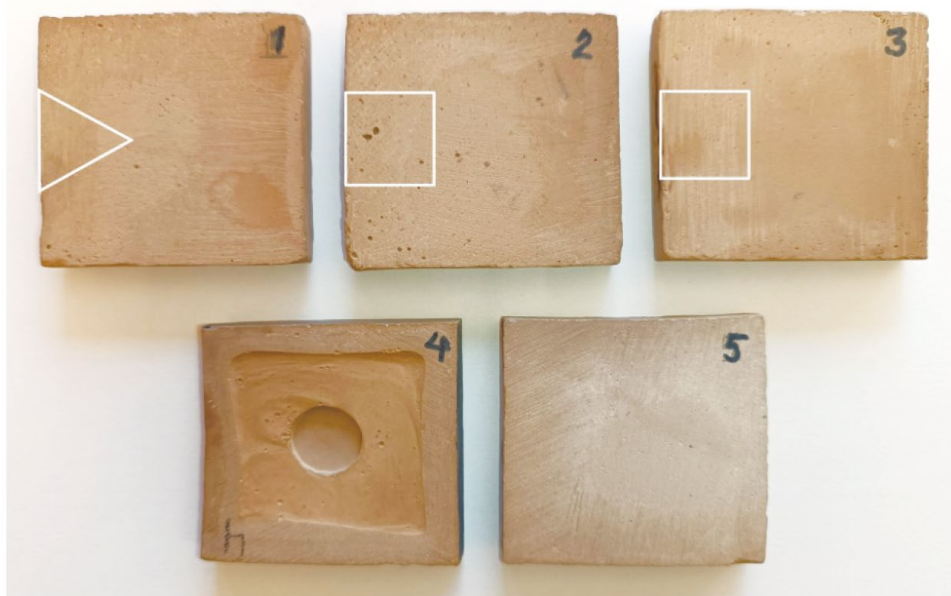


Рис. 1. Фотография образцов с сигнатурами внутренних дефектов.

Теплопроводность материала керамических пластин оценивали согласно методике [12] по результатам измерения температуропроводности на приборе LFA 427 фирмы Netzsch (Германия), использующего лазерный импульсный нагрев в динамической среде аргона, в диапазоне температур от 20 до 1000 °С на образцах диаметром 10 мм и толщиной от 2,5 до 3,5 мм, которые были вырезаны из заготовок образцов для испытания прочности на изгиб. Следует отметить, что для керамических материалов, имеющих сложную гетерогенную структуру и связанные с этим сложные механизмы теплопереноса, применим термин «эффективная теплопроводность». В данном случае, в соответствии с законом Фурье, теплопроводность является коэффициентом пропорциональности между усредненным по объему тепловым потоком (в направлении перпендикулярном толщине образца) и средним сглаженным градиентом температуры.

После обжига плитки имели плотность от 3,78 до 3,91 г/см³, открытую пористость не более 1 %, твердость 16—19 ГПа, прочность на изгиб 280—350 МПа и коэффициент теплопроводности ~25 Вт/(м·К).

Для исследования были выбраны четыре дефектных образца №№ 1—4 белосерого цвета толщиной 10 мм, а также бездефектный контрольный образец № 5 толщиной 10 мм. Фотография исследованных образцов с сигнатурами проекций внутренних дефектов приведена на рис. 1.

Образцы содержали следующие искусственные дефекты. Образец 1 имел внутреннюю полость треугольной формы с длиной стороны 30 мм и остаточной толщиной стенки около 3 мм с обеих сторон изделия. Образцы 2 и 3 имели внутреннюю полость квадратной формы с длиной стороны 17 мм и остаточной толщиной стенки около 3 мм с обеих сторон изделия. Образец 4 имел утонение стенки до 2 мм в форме круга диаметром 14 мм по центру изделия.

Образцы исследованы с использованием методики активного теплового контроля (ТК), предусматривающей бесконтактный оптический нагрев поверхности контролируемого изделия с одновременной регистрацией инфракрасных термограмм [13], отражающих распределение температуры на контролируемой поверхности в пространстве и во времени, с помощью тепловизора. Схемы одно- и двухстороннего ТК приведены на рис. 2 и 3.

В качестве источника нагрева использовали две галогенные лампы общей мощностью 4 кВт, нагревающую поверхность объекта контроля за 5 с до 3 °С в односторонней процедуре ТК. Тепловизор Opttris PI 450 с температурной чувствительностью 0,06°С и матрицей из 320×240 элементов и максимальной частотой съемки 30 Гц регистрировал изменение температуры контролируемой поверхности в течение некоторого времени, определяемого длительностью процедуры неразрушающего контроля (НК) на каждой стороне изделия для различных образцов. Частота записи была выбрана равной 18 Гц, т.е. шаг записи термограмм составлял 55,6 мс. При двухстороннем контроле нагрев лампами производили течение 3 с.

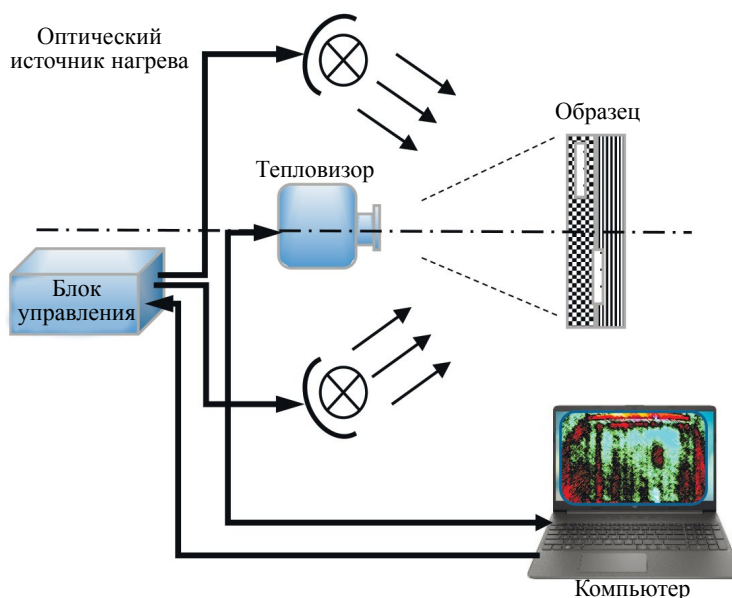


Рис. 2. Односторонний ТК.

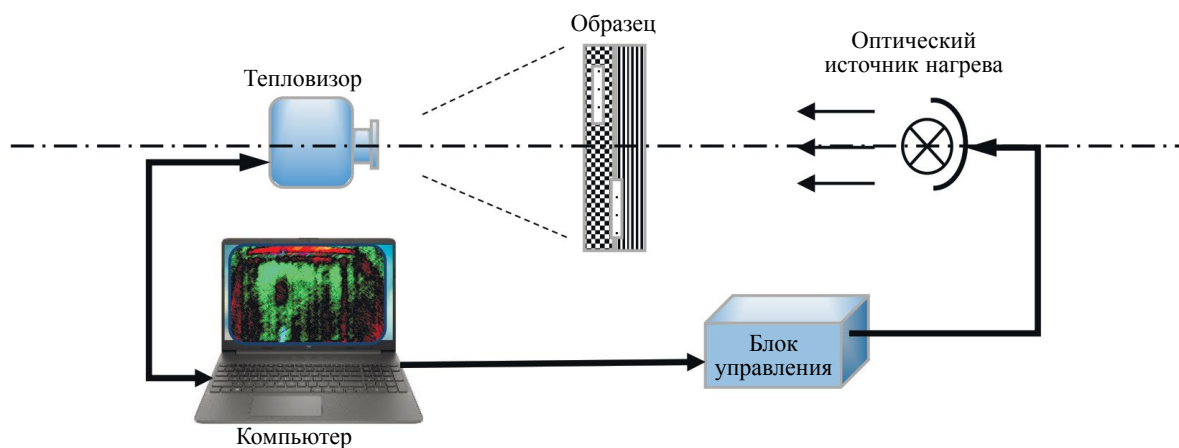


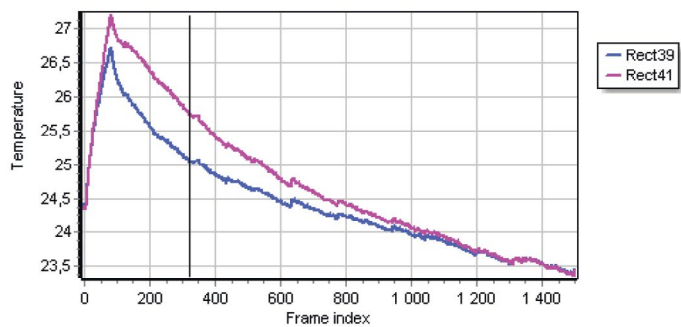
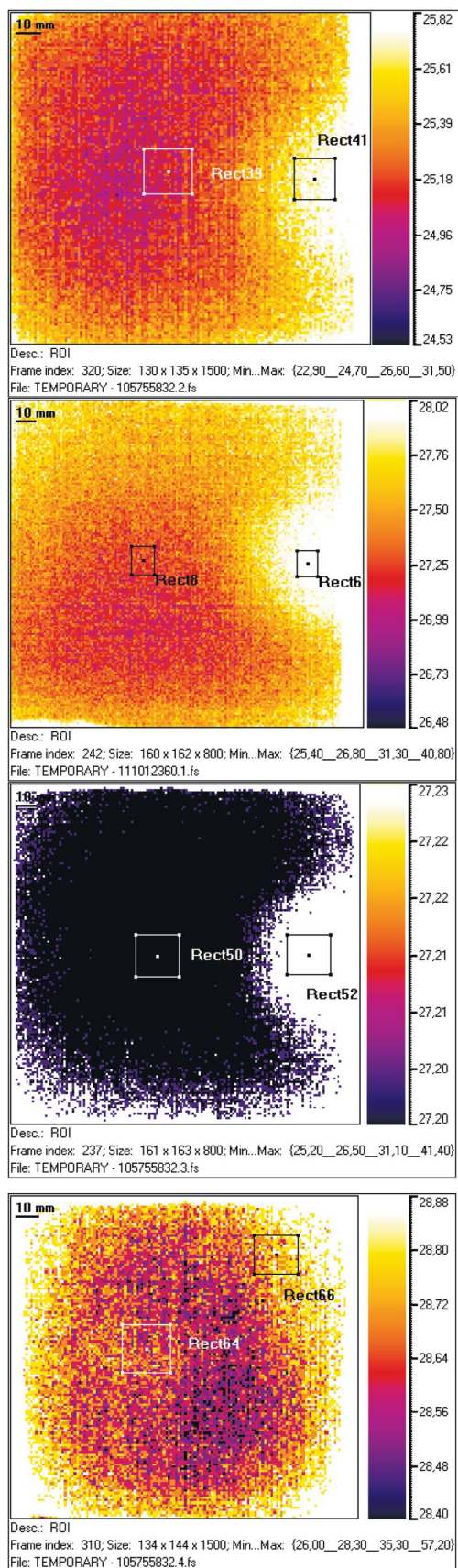
Рис. 3. Двухсторонний ТК.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Одно- и двухсторонний контроль с использованием галогенных ламп

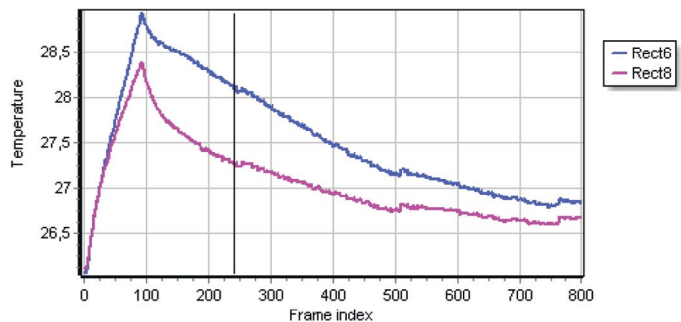
На рис. 4 показаны лучшие с точки зрения информативности термограммы при одностороннем ТК для четырех образцов с профилями изменения средней температуры в двух выбранных зонах квадратной формы в дефектной и бездефектной областях. Согласно теории ТК [10], при равномерном нагреве данные профили близки в начале и конце теплового процесса, а их разность достигает максимума в определенный момент времени, который принимают за оптимальный момент ТК. Например, для образца 1 этот момент наступает в 200-м кадре, что при интервале записи 55,6 мс равно 11,1 с. Аналогично определяют оптимальные времена ТК для других образцов.

Следует заметить, что на термограммах (по крайней мере образцов 1—3) при одностороннем ТК дефектные участки треугольной формы идентифицируются на правой стороне образцов (температурный контраст $\sim 0,8$ °C), однако качество термограмм невысоко, что обусловлено



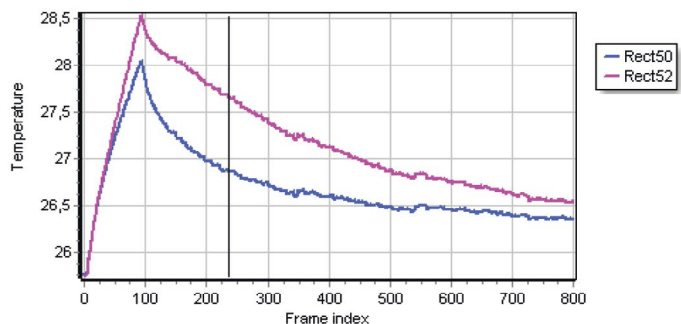
Образец 1

Термограмма 32 из 1499 термограмм и изменение температуры во времени для дефектной и бездефектной зон



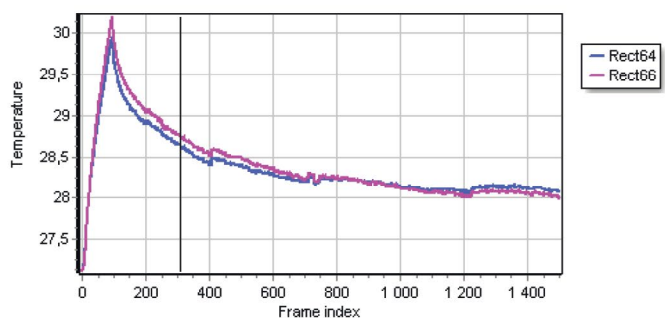
Образец 2

Термограмма 242 из 799 термограмм и изменение температуры во времени для дефектной и бездефектной зон



Образец 3

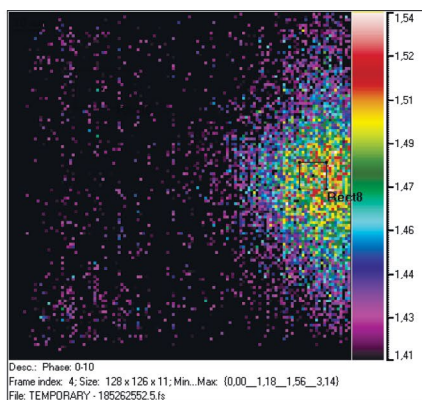
Изображение термограммы 237 из 799 термограмм и изменение температуры во времени для дефектной и бездефектной зон



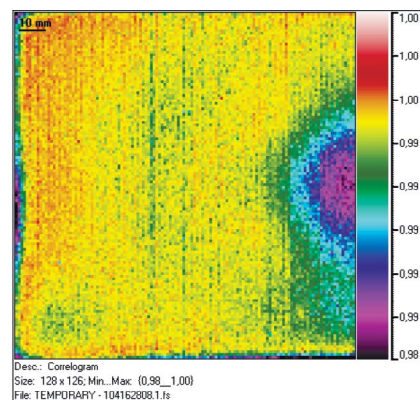
Образец 4

Изображение термограммы 310 из 1499 термограмм и изменение температуры во времени для дефектной и бездефектной зон

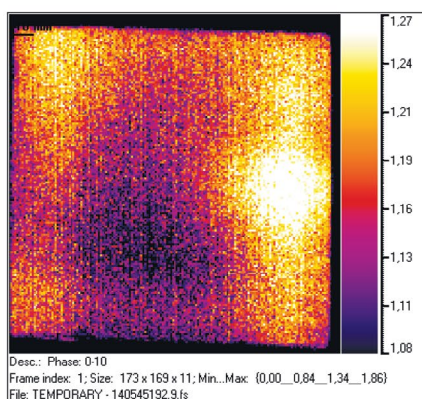
Рис. 4. Исходные термограммы и временные зависимости температуры поверхности образцов 1—4 при одностороннем контроле.



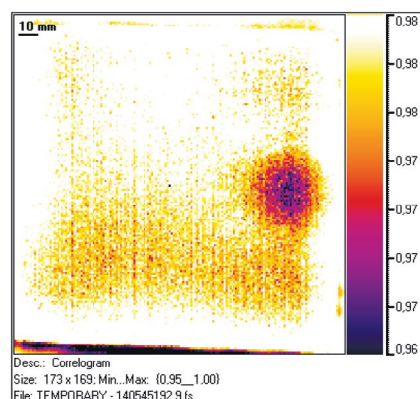
Фурье-преобразование. Фаза 4-й гармоники



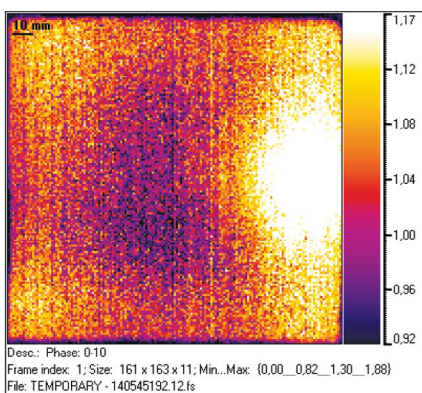
Образец 1



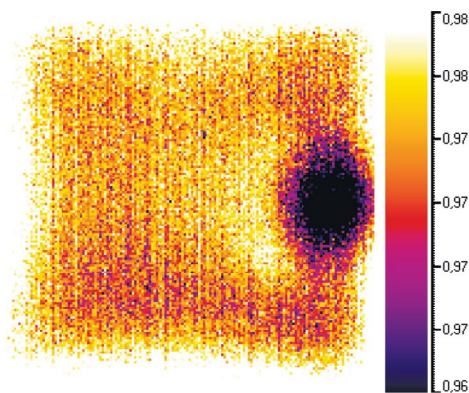
Фурье-преобразование. Фаза 1-й гармоники



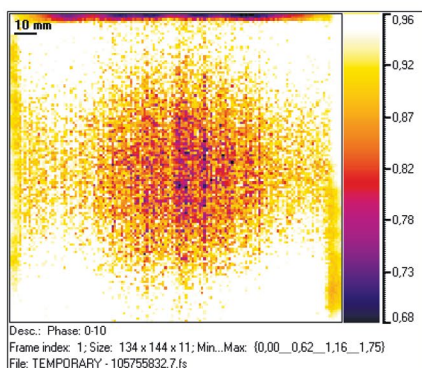
Корреляция с бездефектной зоной



Фурье-преобразование. Фаза 1-й гармоники

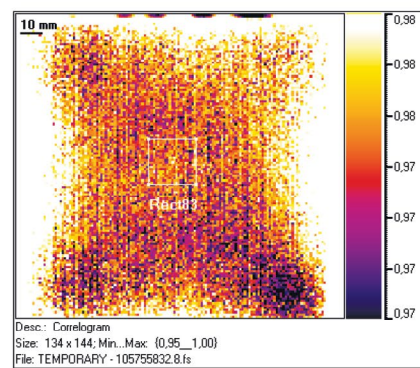


Корреляция с бездефектной зоной



Фурье-преобразование. Фаза 4-й гармоники

Образец 3



Корреляция с зоной Rect 83

Образец 4

Рис. 5. Примеры обработки термограмм при одностороннем ТК образцов 1—4.

низким уровнем нагрева (от 0,5 до 3 °С выше начальной температуры) и значительными температурными шумами. Температурный контраст дефектной области для образца 4 при этом составил ~0,1 °С, что соответствует уровню теплового шума.

Известно [14], что информативность и достоверность теплового контроля можно существенно улучшить, применяя ряд алгоритмов, которые, как правило, используют особенности изменения температуры во времени для дефектных и бездефектных участков, например, преобразование Фурье во времени, метод анализа главных компонент, полиномиальная аппроксимация, корреляция и многие другие [15]. Эти алгоритмы входят в программу обработки экспериментальных данных ThermoLab, разработанную в Томском политехническом университете, которая использует большинство алгоритмов обработки данных, принятых в ТК [16]. Пример результатов обработки данных приведен на рис. 5. Наиболее четко дефектная зона (на правой стороне образцов 1—3) выявляется после применения алгоритма корреляции.

Ниже на рис. 6—9 приведены результаты двухстороннего ТК для дефектных образцов. Следует отметить, что, в отличие от случая одностороннего ТК, температура над дефектом (на левой стороне образцов 1—3) ниже, чем в бездефектной области. На исходной термограмме образца 4 (рис. 9), в котором дефект представляет собой утонение основного изделия, зона дефекта также немного теплее на фронте нарастания сигнала, однако в конце процесса эта зона охлаждается быстрее, чем основное изделие.

Обычно считают, что двухсторонний ТК более эффективен, чем односторонний, однако в данных экспериментах толщина изделий была слишком велика для их эффективного прогрева; избыточная температура стороны, противоположной нагреву достигала всего ~0,5 °С. Температурный контраст дефектных областей при этом составил ~0,1 °С.

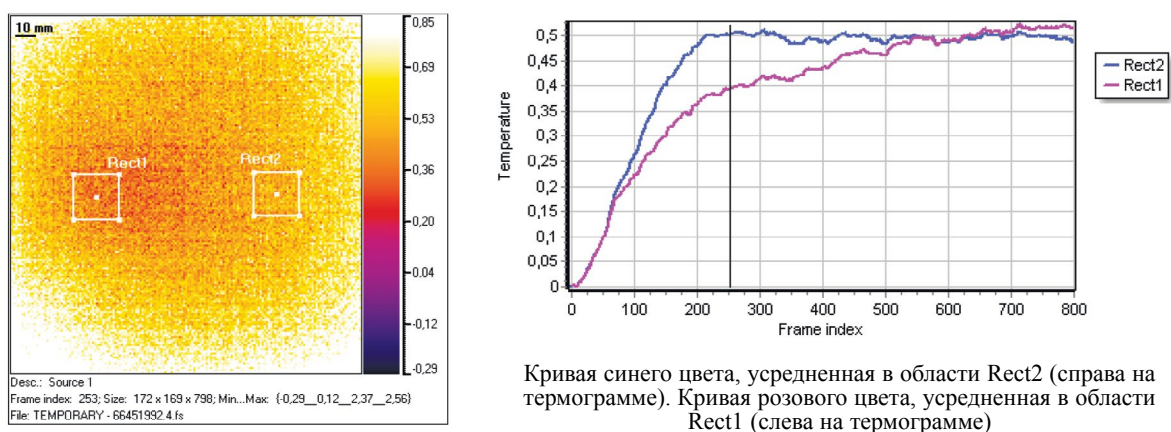


Рис. 6. Исходная термограмма и профиль температуры во времени при двухстороннем ТК дефектного образца 1 (термином Rect обозначены выбранные для анализа дефектные и бездефектные зоны прямоугольной формы).

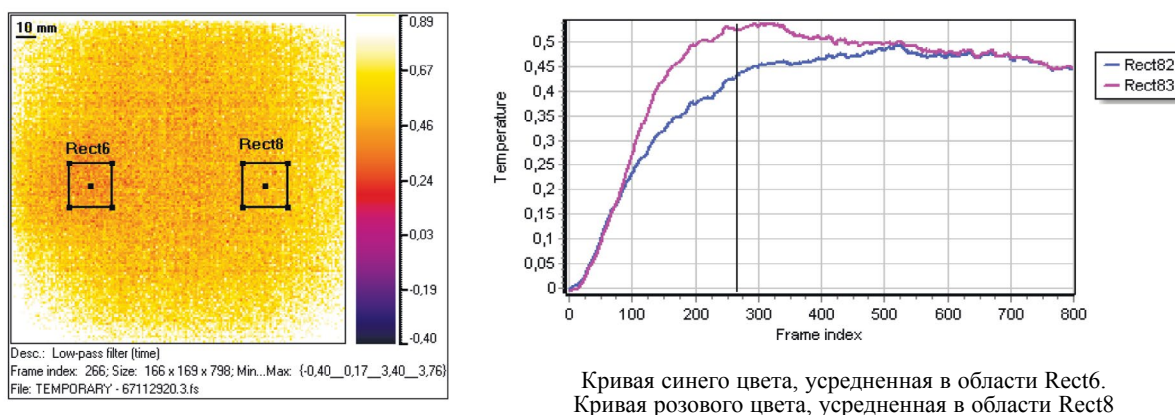


Рис. 7. Исходная термограмма и профиль температуры во времени при двухстороннем ТК дефектного образца 2.

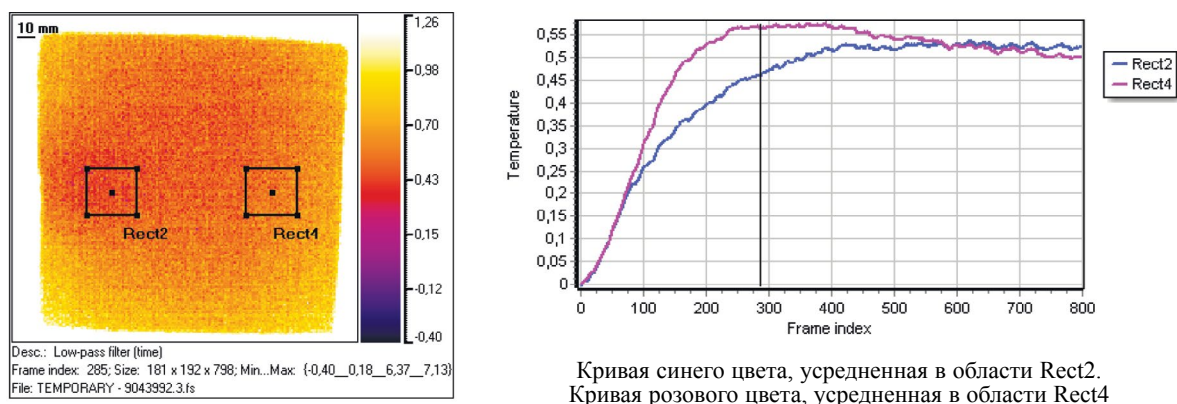


Рис. 8. Исходная термограмма и профиль температуры во времени при двухстороннем ТК дефектного образца 3.

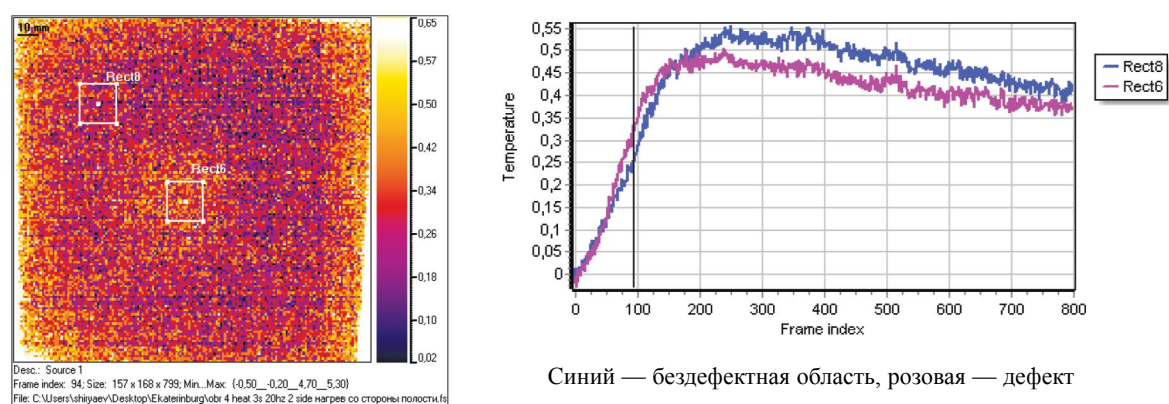


Рис. 9. Исходная термограмма и профиль температуры во времени при двухстороннем ТК дефектного образца 4.

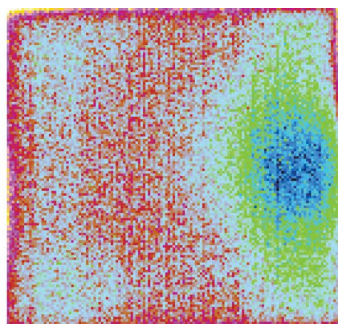
2. Дополнительные алгоритмы обработки при одностороннем ТК

С помощью программы ThermoFit (ТПУ) [17] был применен комплексный вейвлет-анализ к результатам одностороннего ТК образцов 1—4 при нагреве галогенными лампами (рис. 10), в результате чего получены изображения вейвлет-фазы. В качестве ядра вейвлет-преобразования были использованы функции Морле и Гаусса [18]. Видно, что наибольшая контрастность дефектных сигнатур (на правой стороне образцов 1—3) достигается при использовании функции Морле. Интересным моментом, требующим дополнительного анализа, является то, что изначальные сигнатуры дефектов изменяют свою форму на фазовых вейвлет-изображениях.

ВЫВОДЫ

Установлено, что применение оптических средств теплового нагрева дает ряд положительных результатов при выявлении внутренних дефектов в образцах из корундовой керамики.

При использовании галогенных ламп и процедуры одностороннего ТК наилучшие результаты дало применение инструментов «фурье-преобразование» и «корреляция» пакета ThermoLab (ТПУ) по сравнению с исходными необработанными термограммами. Применение комплексного вейвлет-анализа для обработки термограмм также привело к положительным результатам при идентификации дефектов, в особенности на основе функции Морле. Использование двухстороннего ТК оказалось менее эффективным из-за низкой температуры на противоположной стороне изделия ($\sim 0,5$ °C), и, как следствие, незначительного температурного перепада между дефектной и бездефектной областями ($\sim 0,1$ °C), что фактически находится на уровне температурного шума.

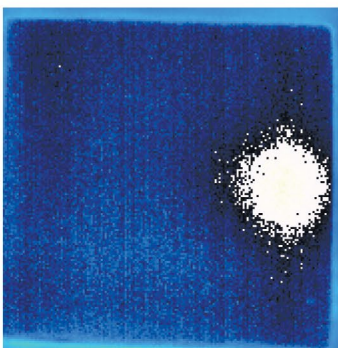


Фаза. Функция Морле

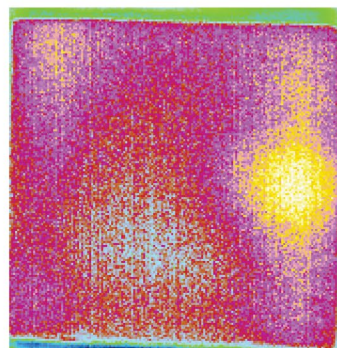


Фаза. Функция Гаусса

Образец 1

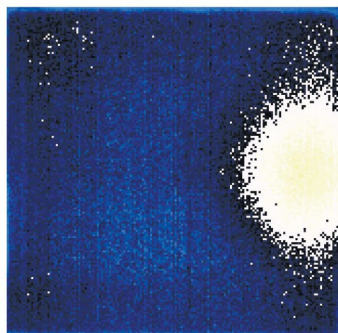


Фаза. Функция Морле

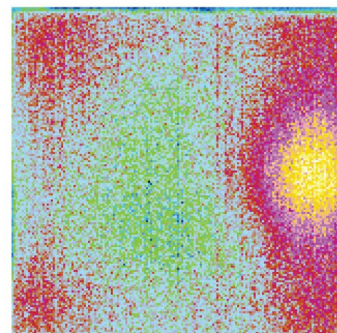


Фаза. Функция Гаусса

Образец 2

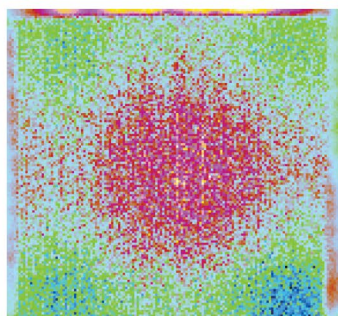


Фаза. Функция Морле

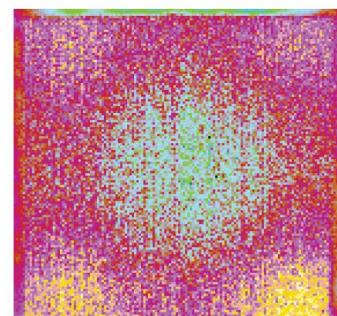


Фаза. Функция Гаусса

Образец 3



Фаза. Функция Морле



Фаза. Функция Гаусса

Образец 4

Рис. 10. Обработка экспериментальных данных с применением комплексного вейвлет-анализа (функции Морле и Гаусса второго порядка).

Дальнейшие исследования будут направлены на использование импульсных оптических источников большой энергии и расширенных процедур обработки исходных термограмм.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. М.: Наука, 1993. 187 с.
2. Семченко Г.Д. Конструкционная керамика и огнеупоры. Харьков: Штрих, 2000. 304 с.
3. Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П. Керамика для машиностроения. М.: Научтехлитиздат, 2003. 380 с.
4. Верещагин В.И., Плетнев П.М., Суржигов А.П., Федоров В.Е. Функциональная керамика. Новосибирск: Наука, 2004. 348 с.
5. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования. М.: РадиоСофт, 2008. 406 с.
6. Химическая технология керамики: учеб. пособие для вузов / Под ред. проф. И.Я. Гузмана. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. 496 с.
7. Пыжова А.П., Коробкинов В.В., Косов В.С. Дефекты тонкокерамических изделий: причины возникновения и способы устранения / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Легпромбытиздат, 1993. 176 с.
8. Zhike Z. Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics // *Ceramics International*. 2021. V. 47. No. 4. P. 4389—4397.
9. Черных С.Е., Костин В.Н., Комоликов Ю.И. Тепловой контроль корундовых керамических пластин // *Дефектоскопия*. 2023. № 59. С. 46—54.
10. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / 2-е издание. М.: ИД «Спектр», 2013. 545 с.
11. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль: развитие традиционных направлений и новые тенденции (обзор) // *Дефектоскопия*. 2023. № 6. С. 38—58.
12. Метод лазерной вспышки в широком интервале температур (LFA427) // NETZSCH-Geratebau GmbH: [официальный сайт]. URL: <http://www.ngb-ta.ru/ru/products/detail/pid.24.html> (дата обращения: 04.02.2024).
13. D'Accardi E., Palumbo D., Errico V., Fusco A., Angelastro A., Galiatti U. Analysing the Probability of Detection of Shallow Spherical Defects by Means of Pulsed Thermography // *J. Nondestruct. Eval.* 2023. V. 42. No. 27.
14. Вавилов В.П. К выбору оптимального алгоритма обработки инфракрасных термограмм в активном тепловом контроле // *Дефектоскопия*. 2013. № 11. С. 5—14.
15. Вавилов В.П., Маринетти С. Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье // *Дефектоскопия*. 1999. № 2. С. 58—71.
16. Vavilov V.P. Thermal nondestructive testing of materials and products: a review // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2017. V. 53. No. 10. P. 707—730.
17. Инструкция по эксплуатации программы ThermoFit Pro. Томск: НИИ ТПУ, 2009. 98 с.
18. Вавилов В.П., Ширяев В.В., Хорев В.С. Обработка результатов активного теплового контроля методом вейвлет-анализа // *Дефектоскопия*. 2011. № 4. С. 70—79.

REFERENCES

1. Shevchenko V.Ia., Barinov S.M. Technical ceramics. M.: Nauka, 1993. 187 p. (in Russian).
2. Semchenko G.D. Structural ceramics and refractories. Kharkov: Shtrikh, 2000. 304 p. (in Russian).
3. Garshin A.P., Gropianov V.M., Zaitsev G.P. Ceramics for mechanical engineering. M.: Nauchtekhlitizdat, 2003. 380 p. (in Russian).
4. Vereshchagin V.I., Pletnev P.M., Surzhikov A.P., Fedorov V.E. Functional ceramics. Novosibirsk: Nauka, 2004. 348 p. (in Russian).
5. Grigorian V.A., Kobylkin I.F., Marinin V.M., Chistiakov E.N. Materials and protective structures for local and individual armoring. M.: RadioSoft, 2008. 406 p. (in Russian).
6. Chemical technology of ceramics : a textbook for universities / Prof. I.Ia. Guzman, Ed. M.: ООО RIF «Stroimaterialy», 2003. 496 p. (in Russian).
7. Pyzhova A.P., Korobkinov V.V., Kosov V.S. Defects in fine ceramic products: causes and methods of elimination / 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Legprombytizdat, 1993. 176 p. (in Russian).
8. Zhike Z. Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics // *Ceramics International*. 2021. V. 47. No. 4. P. 4389—4397.
9. Chernykh S.E., Kostin V.N., Komolikh Iu.I. Thermal control of corundum ceramic plates // *Defektoskopiya*. 2023. No. 59. P. 46—54 (in Russian).
10. Vavilov V.P. Infrared thermography and thermal control / (2-e izdanie). M.: ID «Spektr», 2013. 545 p. (in Russian).
11. Vavilov V.P. Thermal non-destructive testing: the development of traditional directions and new trends (review) // *Defektoskopiya*. 2023. No. 6. P. 38—58 (in Russian).
12. The method of laser flash in a wide range of temperatures (LFA427) // NETZSCH-Geratebau GmbH. URL: <http://www.ngb-ta.ru/ru/products/detail/pid.24.html> (Date of application: 02/04/2024) (in Russian).
13. D'Accardi E., Palumbo D., Errico V., Fusco A., Angelastro A., Galiatti U. Analysing the Probability of Detection of Shallow Spherical Defects by Means of Pulsed Thermography // *J. Nondestruct. Eval.* 2023. V. 42. No. 27.

14. *Vavilov V.P.* On the choice of the optimal algorithm for processing infrared thermograms in active thermal testing // Defektoskopiya. 2013. No. 11. P. 5—14 (in Russian).
 15. *Vavilov V.P., Marinetti S.* Pulse phase thermography and thermal tomography based on the Fourier transform // Defektoskopiya. 1999. No. 2. P. 58—71 (in Russian).
 16. *Vavilov V.P.* Thermal nondestructive testing of materials and products: a review // Russ. J. Nondestruct. Test. 2017. V. 53. No. 10. P. 707—730.
 17. Operating instructions for the ThermoFit Pro program. Tomsk: NII TPU, 2009. 98 p. (in Russian).
 18. *Vavilov V.P., Shiriaev V.V., Khorev V.S.* Processing of the results of active thermal testing by the method of wavelet analysis // Defektoskopiya. 2011. No. 4. P. 70—79 (in Russian).
-

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛИТИЯ В ПЛАСТОВЫХ ВОДАХ МЕТОДОМ ЯМР-РЕЛАКСОМЕТРИИ

© 2024 г. И.В. Бызов^{1,*}, С.В. Жаков^{1,**}, А.А. Мысик^{1,***}, И.А. Кунаккужин^{2,****}

¹Институт физики металлов УрО РАН, Россия 620137 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

²АО «СибНефтеГаз» ПАО НК «РОСНЕФТЬ», Россия 629305 Новый Уренгой, ул. Таёжная, 78а

E-mail: *ivbyzov@gmail.com; **zhakov@imp.uran.ru; ***a.mysik@ya.ru; ****kunakkuzhin@mail.ru

Поступила в редакцию 23.05.2024; после доработки 21.06.2024

Принята к публикации 21.06.2024

Предложена процедура определения концентрации лития в пластовых водах методом ЯМР-релаксометрии. Метод позволяет оперативно определять содержание лития при концентрациях представляющих промышленный интерес. Эксперименты показали хорошее согласие данных, полученных предлагаемым методом, с данными, полученными методом индукционно связанной плазмы (ИСП).

Ключевые слова: концентрация лития, пластовые воды, ЯМР-релаксометрия.

DETERMINATION OF LITHIUM CONCENTRATION IN FORMATION WATER BY NMR RELAXOMETRY METHOD

© 2024 I.V. Byzov^{1,*}, S.V. Zhakov^{1,**}, A.A. Mysik^{1,***}, I.A. Kunakkuzhin^{2,****}

¹Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences,

Russia 620137 Yekaterinburg, S. Kovalevskaya Street, 18

²JSC "SibNeftegaz" PJSC "ROSNEFT Oil Company",

Russia 629305 Novy Urengoy, Tayezhnaya str., 78a

E-mail: *ivbyzov@gmail.com; **zhakov@imp.uran.ru; ***a.mysik@ya.ru; ****kunakkuzhin@mail.ru

A procedure has been proposed for determining the concentration of lithium in formation waters using NMR relaxometry. The method allows to determine quickly lithium content at concentrations of industrial interest. Experiments showed good agreement of the proposed method with the inductively coupled plasma (ICP) method.

Keywords: concentration of lithium, formation waters, NMR relaxometry.

DOI: 10.31857/S0130308224070053

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы резко увеличивается потребность промышленности в литии в связи с ростом рынка аккумуляторов для электромобилей и электронной техники. В России одним из главных источников лития являются пластовые воды нефтяных и газовых месторождений, где по предварительным оценкам концентрация лития может достигать более 0,7 г/л [1]. При этом добыча может быть рентабельной и при более низкой концентрации лития [2]. В связи с этим возникает необходимость оперативного определения концентрации лития в пластовых водах, желательно, непосредственно на скважине. Кроме того, процесс извлечения лития из пластовых вод включает стадию выпаривания, при которой пластовые воды длительное время выдерживаются в открытом бассейне для повышения концентрации лития до концентрации порядка 6% необходимой для дальнейшей переработки. В этом процессе также необходимо оперативно отслеживать текущую концентрацию лития в рассоле [3].

На данный момент существуют несколько методов определения концентрации лития в воде: химические [2], физические: метод индукционно связанной плазмы (ИСП) [4], масс-спектрометрия. Хотя эти методы могут обеспечить достаточную точность, их основными недостатками являются стационарное исполнение приборов и время необходимое для подготовки проб и проведения анализа. Кроме того, на стоимость анализа влияет высокая стоимость приборов и достаточно высокие требования к квалификации персонала. В связи со сказанным представляется целесообразным создание метода, позволяющего оперативно определять концентрацию лития в пластовых водах непосредственно на скважине либо на опорном газо/нефтепромысле.

В данной работе для определения концентрации лития в воде предлагается использовать метод ЯМР-релаксометрии. Так как ядро изотопа ⁷Li имеет магнитный момент и спин 3/2, процентное содержание этого изотопа 92,41 %, то на образце жидкости, содержащей атомы лития, будет наблюдаться магнитный резонанс на ядрах лития. При этом возможно наблюдения ЯМР

в двух вариантах: первый — высокого разрешения [6], т.е. наблюдения спектра ЯМР-ядер разных элементов, присутствующих в исследуемом образце, второй — ЯМР низкого разрешения, измерение релаксационной кривой, например, последовательности Карра—Парселла—Бейбума—Гилла (CPMG-последовательность) на ядрах лития.

В настоящее время на мировом рынке предлагаются компактные приборы обоих вариантов исполнения. Первый (ЯМР высокого разрешения) требует достаточно высокой квалификации персонала при анализе спектров, поскольку требуется определить содержание лития на фоне присутствующих в спектре линий других элементов. Второй (предлагаемый) метод — резонансная частота прибора настраивается на частоту Лармора ядра исследуемого элемента, в нашем случае — лития. Поэтому исключается необходимость отстройки от ЯМР-сигнала ядер других элементов, присутствующих в образце. Кроме того, магнитная система спектрометра должна обеспечивать высокую однородность магнитного поля H в области расположения исследуемого образца. Неоднородность магнитного поля ΔH должна удовлетворять условию $\Delta H/H < 10^{-5}—10^{-6}$, что приводит к высокой стоимости прибора. В предлагаемом варианте ЯМР-релаксометра требования к однородности магнитного поля в системе значительно ниже: $\Delta H/H \sim 10^{-2}—10^{-3}$, что существенно снижает стоимость прибора.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛИТИЯ

Предлагаемый метод определения концентрации лития в воде состоит в измерении релаксационной кривой на образце методом Карра—Парселла—Мейбума—Гилла (КПМГ) (Carr—Purcell—Meiboom—Gill, CPMG-последовательность) [7]. Начальная точка получаемой в эксперименте релаксационной кривой пропорциональна: 1) напряженности магнитного поля, в котором находится измеряемый образец, 2) количеству ядер лития в образце. Поэтому для определения концентрации достаточно измерить релаксационную кривую на эталонном образце с известной концентрацией лития и сравнить начальные точки релаксационных кривых для измеряемого образца и эталона.

Процедура измерения концентрации состоит из следующих этапов. Подготавливается калибровочный образец, представляющий собой раствор соли лития, например LiCl, заданного объема V_0 , с известной концентрацией лития C_0 , например, $V_0 = 2 \text{ см}^3$, $C_0 = 1000 \text{ мг/л}$ ($C_0 = 1000 \text{ ppm}$). Измеряется релаксационная кривая эталонного образца, фиксируется начальная амплитуда A_0 релаксационной эталонной кривой. Для определения концентрации лития берется проба исследуемой жидкости объема V , близкого к объему калибровочного образца, и измеряется релаксационная кривая. Фиксируется начальная амплитуда релаксационной кривой A_x . Для измеренных начальных точек релаксационных кривых эталона и исследуемого образца получаем следующие соотношения: $A_0 = b \cdot C_0 \cdot V_0$ (для эталона), $A_x = b \cdot C_x \cdot V$ (для исследуемого образца). Здесь b — константа, определяемая параметрами прибора. Из пропорции $A_x / A_0 = (C_x \cdot V) / (C_0 \cdot V_0)$ определяется концентрация C_x в исследуемом образце: $C_x = C_0 \cdot (A_x / A_0) \cdot (V_0 / V)$. При одинаковых объемах эталона и исследуемого образца $C_x = C_0 \cdot (A_x / A_0)$. Для удобства измерений можно заранее построить калибровочную прямую, дающую зависимость начальной амплитуды релаксационной кривой от концентрации лития в образце заданного объема.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ АМПЛИТУДЫ РЕЛАКСАЦИОННОЙ КРИВОЙ

Получаемые в эксперименте релаксационные кривые всегда содержат некоторый уровень шума, величина которого зависит от концентрации определяемого элемента и числа измерений. Кроме того все ЯМР-релаксометры имеют «мертвое время», равное интервалу времени между возбуждающим импульсом приложенного к образцу переменного магнитного поля и первым спиновым эхо, принимаемым от образца. В результате, измеряемые релаксационные кривые имеют начальную точку, равную мертвому времени прибора, а не моменту времени $t = 0$. Поэтому для определения начальной точки необходимо провести экстраполяцию релаксационной кривой до значения при $t = 0$. Для этого можно воспользоваться стандартной процедурой, применяемой при определении пористости методом ЯМР-релаксометрии. Начальный участок релаксационной кривой с достаточно высокой точностью можно считать экспонентой, поэтому логарифм от релаксационной кривой — это прямая с некоторым разбросом точек, обусловленным шумами измерения. Измеряемая релаксационная кривая имеет вид:

$$R(t_n) = R_0 \exp\left(\frac{-n \cdot TE}{T_2}\right), \quad (1)$$

где R_0 — начальная точка релаксационной кривой; $t_n = n \cdot TE$; n — порядковый номер спинового эхо; TE — интервал времени между спиновыми эхо; T_2 — время поперечной релаксации исследуемого образца; $R(t_n) = R(n \cdot TE)$ — измеряемые в эксперименте амплитудные значения релаксационной кривой, соответствующие моментам времени $t_n = n \cdot TE$.

Логарифмируя (1), получаем $\ln(R_n) = \ln(R_0) - n \cdot TE/T_2$. Обозначая $y_n = \ln(R_n)$, $x_n = n \cdot TE$, получаем линейную зависимость $y_n = \ln(R_n) - x_n/T_2$ между y_n и x_n . Значения $y_n = \ln(R_n)$ при $n > 1$ определяются из эксперимента.

Таким образом, наблюдаемая в эксперименте релаксационная кривая может быть аппроксимирована в логарифмических координатах прямой линией: $y = bx + c$. Коэффициенты этой прямой b и c определяются методом наименьших квадратов, начальная точка релаксационной кривой находится из условия $c = \ln(R(0))$ или $R(0) = \exp(c)$.

Эксперименты проводились на ЯМР-релаксметре, изготовленном в лаборатории прикладного магнетизма ИФМ УрО РАН. Частота Лармора для лития составляла $f = 7,69$ МГц. Для калибровки использовался ГСО (государственный стандартный образец) с исходной концентрацией ионов лития 1000 мг/л, из которого были приготовлены образцы в диапазоне 8—1000 мг/мл. Объемом каждого образца составлял 2 куб. см.

Для обеспечения достаточной точности при определении малых концентраций лития необходимо накапливать сигнал, т.е. проводить многократное измерение релаксационной кривой. При этом, как известно, отношение S/N —сигнал шум растет пропорционально квадратному корню из числа измерений n : $S/N \sim n^{1/2}$. После каждого измерения релаксационной кривой необходима пауза—время поляризации T_w для восстановления магнитного момента образца. Время T_w должно быть примерно в 5 раз больше времени релаксации T_1 для данной концентрации лития. Однако время T_1 существенно возрастает при уменьшении концентрации лития. При малых концентрациях (10—200 ppm), которые могут интересовать потребителей, приходится многократно повторять измерение, чтобы накапливать сигнал, а T_1 может составлять до 30 с. В результате время измерения, необходимое для получения приемлемой точности, значительно возрастает. Для сокращения времени измерения в образцы добавлялся медный купорос ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 200 мг/мл). Парамагнитные ионы меди значительно, в разы, уменьшают время релаксации, но при этом не влияют на амплитуду измеряемого ЯМР-сигнала лития. Это позволило обеспечить необходимую точность и измерять малые концентрации лития за приемлемое время. На рис. 1 приведена зависимость начальной амплитуды релаксационной кривой от концентрации лития. Объем образцов 2 см³.

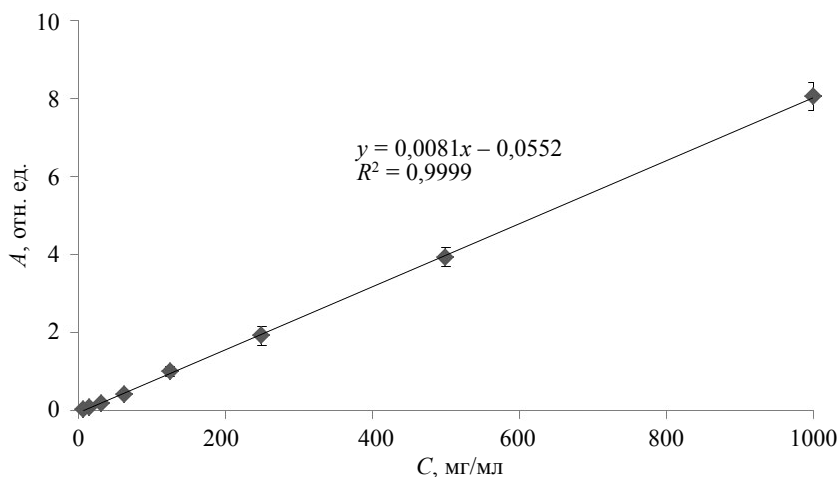


Рис. 1. Зависимость начальной амплитуды релаксационной кривой от концентрации лития.

Затем были проведены измерения образцов пластовых вод из нескольких скважин Сибири методом ЯМР-релаксометрии и методом ИСП. Результаты приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Анализ табл. 1 и рис. 2 показывает, что метод ЯМР-релаксометрии позволяет фиксировать малые концентрации лития на уровне 10—20 мг/л. Наблюдаемые расхождения результатов анализа методами ИСП и ЯМР могут быть обусловлены следующими причинами. При подготовке к анализу методом ИСП проводилось фильтрование исследуемой скважинной жидкости. В результате возможно удаление части лития вместе с отфильтрованной взвесью, что привело к

Таблица 1

Результаты измерения концентрации лития в образцах пластовых вод методами ИСП и ЯМР

№ пп	Лабораторный номер	Метод ИСП, мг/л	Метод ЯМР, мг/л
1	115X1	0	0
2	119X6	6,8	16,7
3	110X0	22,5	21,9
4	115X6	22,5	31,3
5	113X5	105,5	62
6	110X6	107,5	194
7	115X9	75	55
8	119X3	245	174

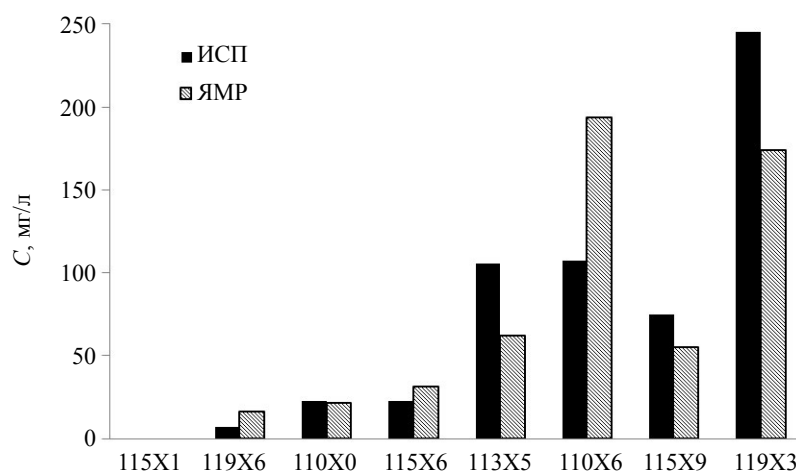


Рис. 2. Концентрация лития в образцах пластовых вод, измеренная методами ИСП и ЯМР-релаксометрии.

занижению определяемой концентрации лития по сравнению с методом ЯМР, при котором фильтрация не проводится. Погрешность метода ЯМР может быть обусловлена добавлением CuSO_4 в образцы пластовых вод. Содержащиеся в исследуемых образцах соли лития при реакции с CuSO_4 могли образовывать осадок, содержащий литий, который не фиксировался методом ЯМР. В результате ЯМР показал концентрацию лития меньше, чем ИСП. Для более точного сравнения методов необходим химический анализ пластовых вод для выяснения возможности образования содержащего литий осадка при реакции с CuSO_4 , тем не менее предлагаемый метод позволяет оперативно определять промышленно значимые концентрации лития.

ВЫВОДЫ

Применение метода ЯМР-релаксометрии для анализа концентрации лития в пластовых водах нефтяных и газовых месторождений представляется перспективным, поскольку метод обладает следующими привлекательными характеристиками.

Не требуется подготовка образца, для ускорения процесса измерения достаточно добавить в измеряемый образец раствор CuSO_4 .

Простота процесса измерения, нет особых требований к квалификации персонала, метод ЯМР-релаксометрии знаком геофизикам по исследованию кернов.

Поскольку амплитуда сигнала ЯМР зависит от рабочей частоты ω (частоты Лармора), а $\omega = \gamma B_0$, то чувствительность метода может быть повышена за счет увеличения напряженности магнитного поля B_0 в магнитной системе релаксометра.

Бюджет, тема «Магнит», номер Г.Р. 122021000034-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ариффулин А., Зураба Е.* Российский рассольный литий: проблемы и возможности // Энергетическая политика. 2023. № 8 (187). С. 38—47. DOI: 10.46920/2409-5516_2023_8186_38
2. *Marza M., Ferguson G., Thorson J., Barton I., Kim Ji-Hyun, Ma Lin, McIntosh J.* Geological controls on lithium production from basinal brines across North America // Journal of Geochemical Exploration. 2024. V. 257. P. 107383. doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107383
3. *Бандалетова А.А., Гаврилов А.Ю., Галин Е.В.* Извлечение лития из попутных вод на примере оренбургского НГКМ // ПРОНЕФТЬ. 2021. Т. 6. № 1. С. 29—32. doi.org/10.51890/2587-7399-2021-6-1-29-32
4. *Sapkota A., Krachler M., Scholz Ch., Andriy K., Cheburkin A.K., Shotyky W.* Analytical procedures for the determination of selected major (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, and Ti) and trace (Li, Mn, Sr, and Zn) elements in peat and plant samples using inductively coupled plasma-optical emission spectrometry // Analytica Chimica Acta. 2005. V. 540 (2). P. 247—256. doi.org/10.1016/j.aca.2005.03.008
5. *Гаврилов А.Ю., Бандалетова А.А., Девлешова Н.А., Галин Е.В., Писарев М.О., Лисс Д.А.* Извлечение лития из попутных вод нефтяных и газовых месторождений / Интернет ресурс <https://ntc.gazprom-neft.ru/scientific-publications/14280/>
6. *Araneda J.F., Hui P., Leskowitz G.M., Riege S.D., Mercado R., Green Ch.* Lithium-7 qNMR as a method to quantify lithium content in brines using benchtop NMR // Analyst. 2021. V. 146. P. 882—888. DOI: 10.1039/d0an02088e. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=20378>
7. *Фаррар Т., Беккер Э.* Импульсная и Фурье-спектроскопия ЯМР. М.: Мир, 1973. 165 с.

REFERENCES

1. *Arifulin A., Zaruba E.* Russian brine lithium: problems and opportunities // Energy Policy. 2023. V. 8 (187). P. 38—47.
2. *Marza M., Ferguson G., Thorson J., Barton I., Kim Ji-Hyun, Ma Lin, McIntosh J.* Geological controls on lithium production from basinal brines across North America // Journal of Geochemical Exploration. 2024. V. 257. P. 107383. doi.org/10.1016/j.gexplo.2023.107383
3. *Bandaletova A., Gavrilov A., Galin E.* Lithium extraction from associated waters on the example of Orenburg OGCF // PROneft, Professionally about Oil. 2021. V. 6 (1). P. 29—32.
4. *Sapkota A., Krachler M., Scholz Ch., Andriy K., Cheburkin A.K., Shotyky W.* Analytical procedures for the determination of selected major (Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, and Ti) and trace (Li, Mn, Sr, and Zn) elements in peat and plant samples using inductively coupled plasma-optical emission spectrometry // Analytica Chimica Acta. 2005. V. 540 (2). P. 247—256. doi.org/10.1016/j.aca.2005.03.008
5. *Gavrilov A., Bandaletova A., Devleshova N., Galin E., Pisarev M., Liss D.* Extraction of lithium from associated waters of oil and gas fields / Internet resource: <https://ntc.gazprom-neft.ru/scientific-publications/14280/>
6. *Araneda J.F., Hui P., Leskowitz G.M., Riege S.D., Mercado R., Green Ch.* Lithium-7 qNMR as a method to quantify lithium content in brines using benchtop NMR // Analyst. 2021. V. 146. P. 882—888. DOI:10.1039/d0an02088e, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=20378>
7. *Farrar T.C., Becker E.D.* Pulse and Fourier Transform NMR. NY: Academic Press, 1971.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДЕТЕКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ДОЗИМЕТРИИ

© 2024 г. Р.М. Абашев^{1,*}, А.И. Бояринцев^{1,**}, И.И. Мильман^{1,***}, А.Д. Петракович^{1,****},
А.И. Сурдо^{1,*****}

¹Институт физики металлов УрО РАН,
Россия 620077 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
E-mail: *abashevrm@imp.uran.ru; **a.i.boyarincev@imp.uran.ru; ***milman@imp.uran.ru;
****petrakovich2007.an@yandex.ru; *****surdo@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 30.05.2024; после доработки 07.06.2024
Принята к публикации 07.06.2024

Исследованы оптически стимулированная люминесценция (ОСЛ) и эффективность разделения по ОСЛ-выходам нейтронного и гамма-компонентов у образцов аниодефицитного корунда ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$) в керамической и монокристаллической формах с различными нейтронными конверторами. Для ОСЛ-дозиметрии в смешанных гамма-нейтронных полях в качестве перспективного выбран синтезированный по керамической технологии детекторный материал, состоящий из смеси порошков ОСЛ-активного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ и нейтрон-конверторного ^6LiF в пропорции 7:3. Нижняя граница индивидуального эквивалента дозы у такого материала при нейтронном облучении не превышает 30 мкЗв, а дозовая зависимость линейна до 1 Зв.

Ключевые слова: индивидуальный дозиметрический контроль, нейтронная дозиметрия, дозиметрическая система КОРОС-333, оптически стимулированная люминесценция, аниодефицитный корунд.

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF LUMINESCENT DETECTOR MATERIALS BASED ON $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ FOR NEUTRON DOSIMETRY

© 2024 R. M. Abashev^{1,*}, A. I. Boyarincev^{1,**}, I. I. Milman^{1,***}, A.D. Petrakovich^{1,****},
A.I. Surdo^{1,*****}

¹Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
Russia 620108 Yekaterinburg, S. Kovalevskaya str., 18
E-mail: *abashevrm@imp.uran.ru; **a.i.boyarincev@imp.uran.ru; ***milman@imp.uran.ru;
****petrakovich2007.an@yandex.ru; *****surdo@imp.uran.ru

The optically stimulated luminescence (OSL) and the separation efficiency of the neutron and gamma components by OSL outputs were studied for samples of anion-deficient corundum ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$) in ceramic and single-crystal forms with various neutron converters. For OSL dosimetry in mixed gamma-neutron fields, a detector material synthesized using ceramic technology consisting of a mixture of OSL active $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ and neutron-converter ^6LiF powders in a ratio of 7:3 was selected as a promising one. The lower limit of the individual dose equivalent for such material under neutron irradiation does not exceed 30 μSv , and the dose dependence is linear up to 1 Sv.

Keywords: individual dosimetric control, neutron dosimetry, dosimetric system COROS-333, optically stimulated luminescence, anion-defective corundum.

DOI: 10.31857/S0130308224070064

ВВЕДЕНИЕ

Альбедные нейтронные дозиметры являются обязательным элементом в системах индивидуального дозиметрического контроля, применяемых на предприятиях ГК «Росатом». С их помощью и термолюминесцентного (ТЛ) способа считывания дозиметрической информации измеряют индивидуальные эквиваленты доз (ИЭД) $H_p(10)$ в смешанных гамма-нейтронных полях. Одной из проблем, возникающих при разработке таких дозиметров, является ограниченное количество типов детекторов и материалов для них, которые могут быть применены для измерения $H_p(10)$ [1, 2]. Наиболее часто для разделения вкладов в $H_p(10)$ нейтронного и гамма-компонентов используют ТЛ-детекторы на основе ^6LiF и ^7LiF [2]. Такой подход не реализуем, если для считывания используется эффект оптически стимулированной люминесценции (ОСЛ).

Один из вариантов решения задачи, связанной с разработкой альбедных нейтронных ОСЛ-дозиметров, продемонстрирован в [3], где в качестве ОСЛ-активного материала использован аниодефицитный корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$). В [3] показано, что применяя скомпонованную в пленку смесь порошков ОСЛ-активного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ и нейтрон-конверторного $^6\text{Li}_2\text{CO}_3$, можно соз-

дать нейтронно-чувствительные ОСЛ-детекторы. Однако такая форма детекторов не применима для разработанной нами ОСЛ-системы КОРОС-333 [4] из-за конструктивных особенностей используемых дозиметров, в составе которых ОСЛ-детекторы имеют вид дисков размером $\varnothing 5 \times 1$ мм.

Поэтому целью работы являлись разработка высокочувствительного скомпактированного в виде таблеток детекторного материала на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ для альбедных нейтронных ОСЛ-дозиметров и исследование у него дозовых характеристик.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, СПОСОБЫ ИХ ОБРАБОТКИ, СРЕДСТВА И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

При выборе оптимального состава для нейтронно-чувствительного ОСЛ-детектора исследовались ОСЛ-выходы у образцов $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ в керамической (размер зерен — 80—100 мкм) и монокристаллической формах с различными нейтронными конверторами и их расположением. Для таких конверторов были выбраны четыре материала. Два из них были выполнены из ${}^6\text{LiF}$ и ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$, в которых изотоп ${}^6\text{Li}$ при захвате нейтрона будет распадаться на тритий и α -частицу с энергиями соответственно 2,75 и 2,05 МэВ. Пробеги трития и α -частицы в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ не превышают соответственно 30 и 4 мкм [5]. Из-за малых пробегов указанных частиц образцы изготавливались из гомогенизированных смесей порошков $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ и ${}^6\text{LiF}$ либо $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ и ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ в пропорции 7:3 с последующим компактированием в таблетки диаметром 5 мм и толщиной от 0,15 до 0,5 мм и их спеканием при 850—950 К. Размер частиц порошков ${}^6\text{LiF}$ и ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ не превышал 20 мкм. В третьем и четвертом вариантах нейтроны конвертировались в гамма-излучение, которое регистрировалось стандартным монокристаллическим ОСЛ-детектором на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ размером 51 мм. В качестве одного из конверторов использовалась кадмиевая пластинка $10 \times 13 \times 0,2$ мм, а в другом — диск $\varnothing 10 \times 0,9$ мм из компактированного порошка Gd_2O_3 .

Исследуемые образцы облучались на специальном фантоме в поле Pu—Be -источника с потоком быстрых нейтронов $2,12 \times 10^6 \text{ с}^{-1}$ в телесный угол $4\pi \times \text{ср.}$ Фантом был изготовлен в виде параллелепипеда из чистого полиэтилена размером $30 \times 30 \times 15$ см. При данных условиях значения индивидуальных эквивалентов доз для нейтронного и гамма-компонентов определялись с помощью стандартного альбедного термолюминесцентного дозиметра ДВНГ-М при времени его облучения 24 ч и составили соответственно 44,3 и 0,7 мЗв. Изготовленные из порошков образцы также облучались бета-излучением от ${}^{90}\text{Sr}/{}^{90}\text{Y}$ -источника для подбора их оптимальной толщины, при которой ОСЛ-выходы были бы максимальны.

Все ОСЛ-данные были получены с помощью системы КОРОС-333. Измеренный ОСЛ-сигнал S_{OSL} у исследуемых детекторных материалов, облученных в поле Pu—Be -источника, представляет собой сумму двух компонентов, обусловленных облучением нейтронным (S_{OSL_N}) и гамма-излучением (S_{OSL_γ}). Для точной оценки вклада S_{OSL_γ} в высвеченную светосумму S_{OSL} использовались практически нечувствительные к нейтронам ОСЛ-детекторы на основе $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ [6]. Величина S_{OSL_N} определялась как

$$S_{\text{OSL}_N} = S_{\text{OSL}} - S_{\text{OSL}_\gamma}. \quad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Используя (1), были определены компоненты светосумм S_{OSL_γ} и S_{OSL_N} , а затем эффективность разделения нейтронного и гамма-компонента R_N/R_γ . Величина R_N/R_γ вычислялась как нормированное на соответствующие ИЭД (D_N и D_γ):

$$\frac{R_N}{R_\gamma} = \frac{S_{\text{OSL}_N}/D_N}{S_{\text{OSL}_\gamma}/D_\gamma}, \quad (2)$$

где D_N и D_γ — нейтронный и гамма-компоненты ИЭД. Для каждого из детекторных составов значения D_N , D_γ и суммарный ИЭД смешанного гамма-нейтронного облучения $H_p(10) = D_N + D_\gamma$ составляли соответственно 44,3, 0,7 и 45 мЗв.

Полученные результаты измерений и расчетов суммированы в табл. 1. Как видно, наибольшие значения S_{OSL_N}/D_N и соотношения R_N/R_γ имеет детекторный состав из $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ и ${}^6\text{LiF}$. Состав из $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_{3-\delta}$ и ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$ обладает близким к первому составу соотношением R_N/R_γ , но крайне слабыми ОСЛ-выходами S_{OSL_N} и S_{OSL_γ} из-за его низкой оптической прозрачности, что

Таблица 1

Значения $S_{OSL,N}/D_N$, $S_{OSL,\gamma}/D_\gamma$ и R_N/R_γ для исследуемых сочетаний ОСЛ-активного материала и конвертора при $D_N = 44,3$ мЗв и $D_\gamma = 0,7$ мЗв

ОСЛ-материал / конвертор	$S_{OSL,N}/D_N$, мЗв ⁻¹	$S_{OSL,\gamma}/D_\gamma$, мЗв ⁻¹	R_N/R_γ
α -Al ₂ O _{3-δ} (порошок) / ⁶ LiF	1793	2109	0,85
α -Al ₂ O _{3-δ} (порошок) / ⁶ Li ₂ CO ₃	184	245	0,75
α -Al ₂ O _{3-δ} (монокристалл) / Gd ₂ O ₃	275	55056	0,005
α -Al ₂ O _{3-δ} (монокристалл) / Cd	1194	85309	0,014

препятствует прохождению через него стимулирующего излучения и полезного ОСЛ-сигнала. Кроме того, отличительной особенностью состава из α -Al₂O_{3-δ} и ⁶Li₂CO₃ являлась плохая спекаемость. У детекторных составов с конверторами из Gd₂O₃ и Cd получено малое отношение R_N/R_γ , и поэтому они не могут эффективно разделять вклады в индивидуальный эквивалент дозы от нейтронного и гамма-компонентов.

Немаловажным фактором, влияющим на ОСЛ-выход детекторных поликристаллических материалов, является их толщина (d). Так, с одной стороны, ее увеличение должно приводить к возрастанию ОСЛ-выхода вследствие повышения массы ОСЛ-активного материала α -Al₂O_{3-δ}. С другой стороны, при росте толщины будет снижаться прозрачность и, как следствие, ОСЛ-выход исследуемых образцов за счет поглощения и рассеяния в их объеме стимулирующего ОСЛ излучения и измеряемого ОСЛ-сигнала. Поэтому для образцов, изготовленных из α -Al₂O_{3-δ} и ⁶LiF в пропорции 7:3 и обладающих оптимальным сочетанием $S_{OSL,N}/D_N$, $S_{OSL,\gamma}/D_\gamma$ и R_N/R_γ (см. табл. 1), была изучена зависимость ОСЛ-выхода S_{OSL} от толщины образцов d , облученных бета-излучением ⁹⁰Sr/⁹⁰Y-источника дозой 8 мГр (рис. 1а). Из полученных данных следует, что оптимальная толщина для изучаемых компактированных детекторных составов находится в диапазоне 350—450 мкм с максимумом вблизи 430 мкм.

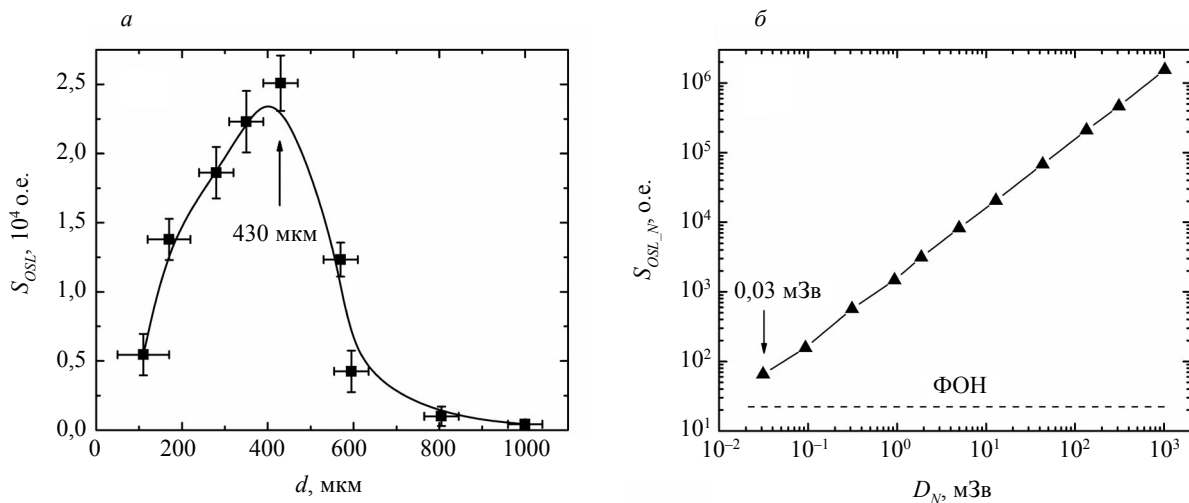


Рис. 1. Зависимости S_{OSL} от толщины d для образцов из α -Al₂O_{3-δ} и ⁶LiF (а) и $S_{OSL,N}$ от дозы D_N их нейтронного облучения в поле Pu—Ве-источника при $d = 430$ мкм (б).

Учитывая полученные выше результаты, далее была изучена зависимость ОСЛ-выхода $S_{OSL,N}$ у образцов из α -Al₂O_{3-δ} и ⁶LiF с $d = 430$ мкм от дозы нейтронного облучения D_N в Pu—Ве-источнике (рис. 1б). Видно, что при таком облучении зависимость $S_{OSL,N}(D_N)$, представленная в двойных логарифмических координатах, близка к линейной в диапазоне доз 0,03—1000 мЗв. Ее можно описать уравнением вида $\lg S_{OSL,N} = \lg A + k \cdot \lg D_N$, где A и k — калибровочный и дозовый коэффициенты соответственно. При такой аппроксимации $S_{OSL,N}(D_N)$ получено, что $A = 1700 \pm 50$ и $k = 0,99 \pm 0,01$. Из анализа зависимости $S_{OSL,N}(D_N)$ также следует, что нижняя граница индивидуального эквивалента дозы при нейтронном облучении образцов из смеси α -Al₂O_{3-δ} и ⁶LiF с $d = 430$ мкм не превышает 0,03 мЗв или

30 мкЗв, что в 3,3 раза меньше требуемой нормативными документами ГК «Росатом» [7]. Однако у полученной зависимости $S_{OSL,N}(D_N)$ пока не достигнута область насыщения, что требует облучения в течение не менее полугода либо использования более мощного Pu—Be-источника.

ВЫВОДЫ

1. Для нейтронной ОСЛ-дозиметрии в смешанных гамма-нейтронных полях разработан высокочувствительный детекторный керамический материал, изготовленный по описанной технологии из смеси ОСЛ-активного порошка α - Al_2O_3 и порошка ^6LiF , являющегося нейтронным конвертором.

2. Нижняя граница индивидуального эквивалента дозы у такого материала при нейтронном облучении составляет 30 мкЗв, и ее величина меньше в 2-3 раза аналогичной, чем у ТЛ-дозиметров, применяемых на предприятиях ГК «Росатом».

3. При использовании конверторов из Gd_2O_3 и Cd получено малое соотношение R_N/R_γ , и поэтому ОСЛ-дозиметры на основе α - Al_2O_3 с такими конверторами не могут эффективно разделять вклады в индивидуальный эквивалент дозы от нейтронного и гамма-компонентов.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Piesch E., Burckhardt B. Albedo Neutron Dosimetry // Radiation protection dosimetry. 1985. V. 10. No. 1-4. P. 175—1985.
2. Piesch E. Albedo Neutron Dosimetry // The International Journal of Applied Radiation and Isotopes. 1982. V. 33. P. 1061—1076.
3. Yukihiro E., Mittani J., Vanhavere F., Akselrod M. Development of new optically stimulated luminescence (OSL) neutron dosimeters // Radiation Measurements. 2008. V. 43. P. 309—314.
4. Сурдо А.И., Абашев Р.М., Красноперов В.С., Мильман И.И., Моисейкин Е.В., Бояринцев А.И. Автоматизированная система индивидуального дозиметрического контроля КОРОС-333 // Дефектоскопия. 2023. № 6. С. 73 — 74.
5. Van Eijk C. W. E. Neutron detection and neutron dosimetry // Radiation protection dosimetry. 2004. V. 110. No. 1-4. P. 5—13.
6. Gibson J.A.B. The Relative Tissue Kerma Sensitivity of Thermoluminescent Materials to Neutrons // Radiation Protection Dosimetry. 1986. V. 15. No. 4. P. 253—266.
7. СТО 1.1.1.01.001.0877-2020. Автоматизированная система индивидуального дозиметрического контроля атомных электростанций. Технические требования, 2020.

REFERENCES

1. Piesch E., Burckhardt B. Albedo Neutron Dosimetry // Radiation protection dosimetry. 1985. V. 10. No. 1-4. P. 175—1985.
2. Piesch E. Albedo Neutron Dosimetry // The International Journal of Applied Radiation and Isotopes. 1982. V. 33. P. 1061—1076.
3. Yukihiro E., Mittani J., Vanhavere F., Akselrod M. Development of new optically stimulated luminescence (OSL) neutron dosimeters // Radiation Measurements. 2008. V. 43. P. 309—314.
4. Surdo A.I., Abashev R.M., Krasnoperov V.S., Milman I.I., Moiseikin E.V., Boyarintsev A.I. Automatic system of individual dosimetric control COROS-333 // Defektoskopia. 2023. No. 6. P. 73—74. (In Russia).
5. Van Eijk C. W. E. Neutron detection and neutron dosimetry // Radiation protection dosimetry. 2004. V. 110. No. 1-4. P. 5—13.
6. Gibson J.A.B. The Relative Tissue Kerma Sensitivity of Thermoluminescent Materials to Neutrons // Radiation Protection Dosimetry. 1986. V. 15. No. 4. P. 253—266.
7. STO 1.1.1.01.001.0877-2020. Equipment of an automated system for individual monitoring of a nuclear power plant. Technical requirements of the operating organization, 2020.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ИЗГОТОВЛЕННЫХ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СПЛАВЛЕНИЕМ ОБРАЗЦОВ ИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ И ПОДВЕРГНУТЫХ УСТАЛОСТНЫМ ИСПЫТАНИЯМ

© 2024 г. Н.В. Гордеев^{1,2,*}, А.Н. Сташков¹, А.М. Матосян^{1,2},
М.К. Корх¹, А.П. Ничипурук¹, Д.А. Шишкин¹, И.Г. Ширинкина¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
E-mail: *gordeev.nikita@urfu.me

Поступила в редакцию 30.05.2024; после доработки 07.06.2024
Принята к публикации 07.06.2024

Исследованы магнитные свойства и структура образцов из конструкционной стали 09Г2С, изготовленных методами литья и селективного лазерного сплавления, после усталостных испытаний на изгиб при их консольном закреплении. Установлено, что кривая усталости для 3D-стали проходит ниже, чем для литой стали 09Г2С. Коэрцитивная сила и остаточная намагниченность меньше возле места излома. Чем больше количество циклов до разрушения, тем меньше разность коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции в разных частях образца. Характер усталостного разрушения литой и 3D-стали различен: у образца из литой стали 09Г2С наблюдается прямой и однородный усталостный излом без видимых очагов зарождения трещин, у образцов из 3D-стали изломы неоднородные, имеются точечные очаги разрушения и гребни отрыва.

Ключевые слова: сталь, селективное лазерное сплавление, усталостные испытания, изгиб, магнитные свойства, фраттография.

MAGNETIC PROPERTIES AND STRUCTURE OF CARBON STEEL SAMPLES MANUFACTURED BY SELECTIVE LASER MELTING AND SUBJECTED TO FATIGUE TESTS

© 2024 N. V. Gordeev^{1,2,*}, A. N. Stashkov¹, A. M. Matosyan^{1,2},
M. K. Korkh¹, A. P. Nichipuruk¹, D. A. Shishkin¹, I. G. Shirinkina¹

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Russia 620108,
Yekaterinburg, S. Kovalevskaya str., 18

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia 620002 Yekaterinburg, Mira str., 19
E-mail: *gordeev.nikita@urfu.me

This study investigates the magnetic properties and structure of 09G2S steel samples fabricated using casting and selective laser melting methods. Fatigue bending tests with cantilever fixation were performed to analyze these properties. It was found that the fatigue curve for 3D-printed steel lies below that of cast steel with a similar chemical composition. Both the coercive force and residual magnetic induction are lower near the fracture site. The greater the number of cycles to failure, the smaller the difference in coercive force and residual magnetic induction in different parts of the sample. The nature of fatigue failure differs between cast and 3D-printed steel. The cast 09G2S steel sample exhibits a straight and homogeneous fatigue fracture without visible crack initiation sites. In contrast, the 3D-printed steel samples show heterogeneous fractures with localized zones of failure and tear-off ridges.

Keywords: steel, selective laser melting, fatigue tests, bending, magnetic properties, metallographic analysis.

DOI: 10.31857/S0130308224070079

ВВЕДЕНИЕ

Сталь 09Г2С нашла широкое применение в производстве труб, работающих под высоким давлением, а также в условиях статических и переменных нагрузок. При воздействии длительных повторяющихся переменных воздействий стальные изделия могут разрушаться от усталости, причем разрушения могут происходить внезапно, без заметных признаков пластической деформации [1], что является серьезной проблемой, особенно для трубопроводов, работающих под высоким давлением и в агрессивных средах.

В работе [2] проведен анализ структурных повреждений в стали 09Г2С, произведенной по технологии 3D-печати электродуговой наплавкой, с использованием акустического, магнитного и оптического контроля. В процессе усталостного нагружения наблюдалось уменьшение акустического сигнала. Магнитные характеристики (коэрцитивная сила и отношение коэрцитивной силы к остаточной магнитной индукции тела) на начальных этапах циклических испытаний показывали рост, но в момент образования магистральной трещины они уменьшились. В работе [3] на основе нейронной сети и измеряемых оптических параметров разработана модель для прогнозирования количества циклов до разрушения стали 09Г2С с погрешностью не более 15 %.

В работах [4, 5] измеряли интенсивность магнитного шума как литых, так и аддитивных образцов из стали 09Г2С при циклическом нагружении. В ходе измерения интенсивности магнитного шума было выявлено, что образцы, прошедшие термическую обработку, проявили более высокий уровень однородности. Также замечено небольшое увеличение измеряемого параметра в ходе увеличения количества циклов.

В работе [6] подробно описывается влияние термической обработки на структуру и магнитные свойства аддитивной стали 09Г2С, полученной методом селективного лазерного сплавления. Структура и магнитные свойства аддитивных и литых образцов значительно различаются. После проведения термической обработки (нормализация) магнитные свойства образцов выравниваются. Магнитные свойства литой и изготовленной на лазерном 3D-принтере стали в ходе малоцикловых испытаний значительно изменяются на начальной стадии испытаний [7].

Однако магнитные свойства (параметры петли магнитного гистерезиса) напечатанных на лазерном 3D-принтере и подвергнутых испытаниям на многоцикловую усталость образцов при изгибе для стали 09Г2С остаются неисследованными. Целью данной работы является изучение магнитных свойств и структуры образцов из стали 09Г2С, изготовленных методами литья и селективного лазерного сплавления и подверженных циклическим испытаниям при изгибе.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования проведены на образцах с размерами $120 \times 10 \times 2$ мм из конструкционной легированной стали 09Г2С (0,1 % С; 1,5 % Мn; <1 % Si). Сравнивались литые образцы (тип № 1) с образцами, напечатанными на лазерном 3D-принтере (далее 3D-сталь) и нормализованными при 980 °С (тип № 2). Напечатанный на 3D-принтере и не прошедший нормализацию образец (тип № 3) исследовался дополнительно к вышеперечисленным образцам. Подробнее параметры печати приведены в работе [7]. Усталостные испытания на изгиб проводились согласно ГОСТ 25.502—79 на оригинальной лабораторной установке. Один из концов образца жестко закреплялся, к другому (свободному) концу прикладывалась нагрузка. Коэффициент асимметрии R синусоидального цикла при усталостных испытаниях был равен -1 . Условия нагружения образцов одинаковые, тип нагружения — «жесткий» (постоянная деформация). Частота циклирования составляла 13,5 Гц. После задания амплитуды работа установки проходила в автоматическом режиме вплоть до разрушения образцов. Магнитные свойства измеряли с помощью вибрационного магнитометра Lake Shore Cryotronics VSM 7407 на вырезанных с разных сторон образцов фрагментах (диаметр 4 мм, толщина 1 мм). Каждый образец измерялся не менее трех раз, результаты усреднялись. Фрактографические исследования изломов образцов проводились с помощью оптического микроскопа Neophot 32.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны кривые усталости для образцов литой (тип № 1) и 3D-стали (тип № 2) 09Г2С. В эксперименте было доведено до разрушения 5 образцов из литой стали и 4 образца из 3D-стали. Из рис. 1 видно, что при максимальной нагрузке количество циклов до разрушения для образцов из литой и 3D-стали совпадает, а при меньших нагрузках кривая для 3D-стали идет ниже, поэтому прогнозируется, что предел выносливости 3D-стали будет меньше, чем у литой стали 09Г2С.

Магнитные свойства образцов после испытаний при максимальной нагрузке приведены в табл. 1 для литой и 3D-стали. После испытаний измерения проводились возле места излома и возле свободного конца.

Из табл. 1 видно, что коэрцитивная сила и остаточная намагниченность возле излома меньше чем возле свободного конца. Максимальная разница значений H_c и M_r возле места излома и свободного конца после разрушения наблюдается у литого образца из стали 09Г2С. Пониженные

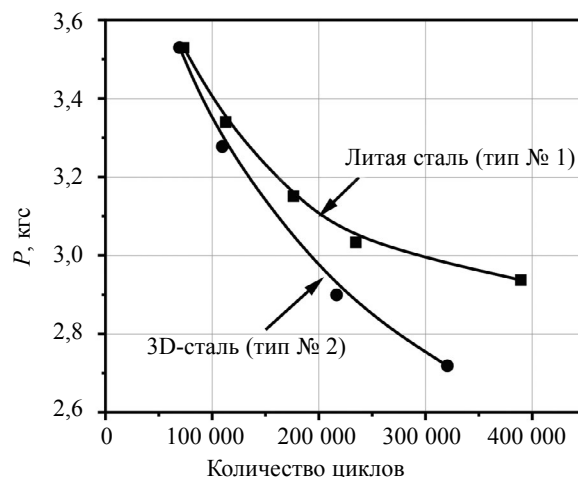


Рис. 1. Зависимость начальной амплитуды релаксационной кривой от концентрации лития.

Таблица 1

Магнитные свойства образцов после испытаний на усталость (амплитуда нагружения максимальная)

Образец	Количество циклов до разрушения	Зона измерений	H_c , А/см	M_r , Гс·см ³ /г	Разность H_c , %	Разность M_r , %
Литая сталь (№ 1)	73 287	Место излома	3,8	0,197	23,7	23,9
		Свободный конец	4,7	0,244		
3D-сталь, отжиг + нормализация (№ 2)	69 475	Место излома	5,1	0,32	9,8	9,4
		Свободный конец	5,6	0,35		
3D-сталь, отжиг (№ 3)	244 660	Место излома	11,8	0,78	2,5	2,6
		Свободный конец	12,1	0,80		

значения H_c возле мест изломов, скорее всего, связаны с релаксацией напряжений после разрушения образцов. Максимальные значения коэрцитивной силы наблюдаются у 3D-стали, подвергнутой только отжигу. При практически одинаковом количестве циклов до разрушения у образцов № 1 и № 2 разница значений H_c и B_r в разных частях образца № 1 максимальная, что свидетельствует о различном характере разрушения литой и 3D-стали.

Оптические изображения зоны изломов, а также схемы зоны излома представлены на рис. 2.

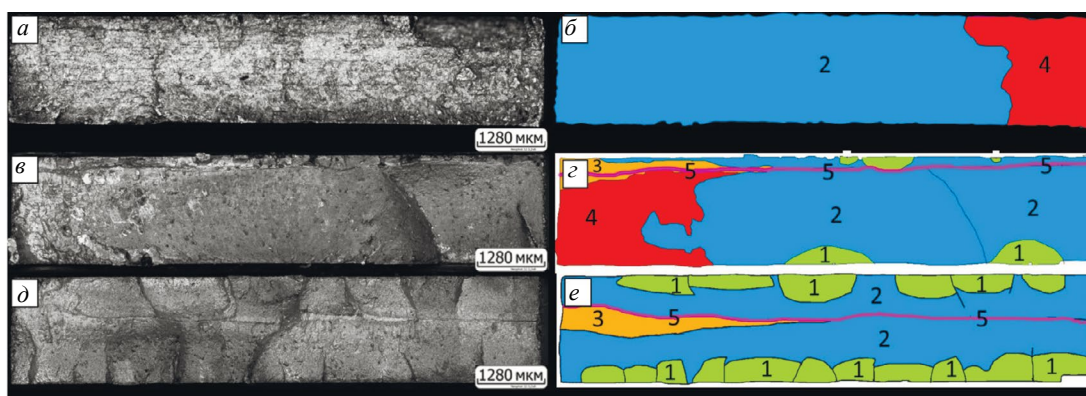


Рис. 2. Оптические изображения зоны изломов при одинаковых условиях нагружения образцов № 1 (а), № 2 (д) и № 3 (в), а также схемы зон усталостных изломов образцов № 1 (б), № 2 (е) и № 3 (з): 1 — очаг разрушения; 2 — зона стабильного роста трещин; 3 — зона ускоренного роста трещин; 4 — зона долома; 5 — гребень отрыва.

Образец № 1 из литой стали 09Г2С характеризуется прямым и однородным усталостным изломом без обнаруженных очагов зарождения трещин (рис. 2а), имеется зона долома 4 (рис. 2б). Образец № 2 из 3D-стали после отжига и нормализации также имеет прямой излом (рис. 2в), но он неоднороден по длине. Имеются несколько точечных очагов разрушения 1 с поверхности на противоположных сторонах образца, на одном из торцов имеется зона долома 4, гребень отрыва 5 сильно смещен к верхнему краю (рис. 2г). Образец № 3 из 3D-стали демонстрирует косой (рис. 2д) и неоднородный излом, с несколькими очагами разрушения 1, сливающимися в сеть ступенек и рубцов, при этом гребень отрыва 5 расположен ближе к центральной линии (рис. 2е).

ВЫВОДЫ

1. Кривая усталости для 3D-стали 09Г2С проходит ниже аналогичной кривой литой стали, что указывает на различия в пределах выносливости этих материалов.

2. Установлено, что коэрцитивная сила и остаточная намагниченность в зоне излома меньше, чем у свободного края образцов после усталостных испытаний. Максимальная разница H_c и M_r возле места излома и свободного конца после разрушения наблюдается у литого образца из стали 09Г2С.

3. Оптические изображения и результаты фрактографического анализа показывают различия в структуре и механизмах разрушения образцов из литой и 3D-стали. Образцы, изготовленные на лазерном 3D-принтере, после разрушения имеют характерный гребень отрыва, который не наблюдается у литого образца.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № г.р. 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4. С. 59—70.

2. Аносов М.С., Рябов Д.А., Чернигин М.А., Соловьев А.А. Неразрушающий контроль накопления усталостных повреждений в стали св-09Г2С, полученной 3D-печатью электродуговой наплавкой // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. № 2. С. 47—53

3. Манцеров С.А., Аносов М.С., Итальянцев Д.С. Диагностика структурной поврежденности стали 09Г2С, полученной с использованием технологии WAAM при малоцикловой усталости на основе нейро-нечеткой классификации // Морской вестник. 2023. № 2. С. 32—36.

4. Бусько В.Н., Ничипурук А.П., Сташков А.Н. Методика механических испытаний и исследование возможности контроля усталостной прочности магнитошумовым методом стальных образцов, изготовленных по аддитивной технологии // Контроль. Диагностика. 2024. № 4. С. 54—63.

5. Бусько В.Н. Лабораторная установка для исследования усталостной повреждаемости плоских ферромагнитных образцов // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 1. С. 165—167.

6. Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Schapova E.A., Kazantseva N.V., Makarova M.V. Structure and Magnetic Properties of 09G2S Steel Obtained by the Selective Laser Melting Method // Physics of the Solid State. 2022. Т. 64. № 3. P. 148—153.

7. Stashkov A.N., Nichipuruk A.P., Schapova E.A., Gordeev N.V., Vshivtsev I.V., Kazantseva N.V. Magnetic Properties of Cyclically Tensile-Deformed Steel 09G2S Manufactured by Selective Laser Melting // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2023. Т. 59. № 1. P. 54—61.

REFERENCES

1. Erasov V.S., Oreshko E.I. Ispytaniia na ustalost' metallicheskih materialov (obzor) CHast' 1. Osnovnye opredeleniia, parametry nagruzheniia, predstavlenie rezul'tatov ispytaniia // Aviatsionnye materialy i tekhnologii. 2020. № 4. P. 59—70.

2. Anosov M.S., Riabov D.A., Chernigin M.A., Solov'ev A.A. Nerazrushaiushchii kontrol' nakopleniia ustalostnykh povrezhdenii v stali sv-09G2S, poluchennoi 3D-pechat'iu elektrodugovoi naplavkoi // Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. 2023. Т. 21. № 2. P. 47—53.

3. Mantserov S.A., Anosov M.S., Ital'iantsev D.S. Diagnostika strukturnoi povrezhdennosti stali 09G2S, poluchennoi s ispol'zovaniem tekhnologii WAAM pri malotsiklovoi ustalosti na osnove neuro-nechetkoi klassifikatsii // Morskoi vestnik. 2023. № 2. P. 32—36.

4. *Bus'ko V.N., Nichipuruk A.P., Stashkov A.N.* Metodika mekhanicheskikh ispytaniy i issledovanie vozmozhnosti kontrolya ustalostnoi prochnosti magnitoshumovym metodom stal'nykh obraztsov, izgotovlennykh po additivnoi tekhnologii // *Kontrol'. Diagnostika*. 2024. № 4. P. 54—63.
 5. *Bus'ko V.N.* Laboratornaia ustanovka dlia issledovaniia ustalostnoi povrezhdaemosti ploskikh ferromagnitnykh obraztsov // *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2011. No. 1. P. 165—167.
 6. *Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Schapova E.A., Kazantseva N.V., Makarova M.V.* Structure and Magnetic Properties of 09G2S Steel Obtained by the Selective Laser Melting Method // *Physics of the Solid State*. 2022. T. 64. No. 3. P. 148—153.
 7. *Stashkov A.N., Nichipuruk A.P., Schapova E.A., Gordeev N.V., Vshivtsev I.V., Kazantseva N.V.* Magnetic Properties of Cyclically Tensile-Deformed Steel 09G2S Manufactured by Selective Laser Melting // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2023. V. 59. No. 1. P. 54—61.
-

ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБ ПРИ ГИДРО- И ПНЕВМОИСПЫТАНИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

© 2024 г. К.Е. Мызнов^{1,*}, О.Н. Василенко^{1,**}, В.Н. Костин^{1,***}, В.С. Тронза²,
А.Н. Бондина², С.С. Кукушкин², Н.Ю. Трякина²

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН,

Россия 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

²ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург»,

Россия 620075 Екатеринбург, ул. Клары Цеткин, 14

E-mail: *myznov@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru; ***kostin@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 16.05.2024; после доработки 11.06.2024

Принята к публикации 14.06.2024

Для выявления зон с наибольшими растягивающими напряжениями и деформациями применен двухпараметровый магнитный метод, основанный на измерении коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции. Для реализации этого метода использовалась мобильная аппаратно-программная система DIUS-1.21M при расположении электромагнитного П-образного преобразователя вдоль оси трубы и по кольцу трубы. Измерения проводились на трех трубах: в первой магнитные характеристики измерялись при отсутствии и при воздействии внутреннего давления; во второй и третьей — до испытания и после разрушения трубы. Выявлено, что внутреннее давление приводит к росту остаточной магнитной индукции во всех зонах как по оси, так и по кольцу, что говорит о возникновении осевых и кольцевых растягивающих напряжений в этих зонах, а изменение коэрцитивной силы произошло неоднозначно. Определено, что разрушение значительно усиливает разброс магнитных характеристик, что объясняется сложным характером напряженно-деформированного состояния разрушенного объекта.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, труба, трубопровод, внутреннее давление, разрыв, магнитный метод, неразрушающий контроль.

CHANGES IN MAGNETIC CHARACTERISTICS OF PIPES DURING HYDRAULIC AND PNEUMATIC TESTS OF TRUNK PIPELINES

© 2024 K.E. Myznov^{1,*}, O.N. Vasilenko^{1,**}, V.N. Kostin^{1,***}, V.S. Tronza², A.N. Bondina²,
S.S. Kukushkin², N.Yu. Tryakina²

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Russia 620108

Yekaterinburg, S. Kovalevskaya Street, 18

²LLC "Gazprom transgas Ekaterinburg",

Russia 620075 Yekaterinburg, Clara Zetkin Street, 14

E-mail: *myznov@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru; ***kostin@imp.uran.ru

To identify the zones with the highest tensile stresses and deformations, a two-parameter magnetic method based on the measurement of coercive force and residual magnetic induction was applied. For realization of the method a mobile hardware and software complex DIUS-1.21M with an electromagnetic U-transducer was used, which was located along the pipe axis and along the pipe ring. Measurements were carried out on three pipes: in the first one magnetic characteristics were measured in the absence and under the influence of internal pressure; in the second and third ones — before the test and after the pipe fracture. It was revealed that internal pressure leads to the growth of residual magnetic induction in all zones both along the axis and along the ring, which indicates the occurrence of axial and circular tensile stresses in these zones, and the change of coercivity occurred ambiguously. It was found that fracture significantly increases the scatter of magnetic characteristics, which is explained by the complex nature of the stress-strain state of the fractured object.

Keywords: stress-strain state, pipe, pipeline, internal pressure, pipe break, magnetic method, nondestructive testing.

DOI: 10.31857/S0130308224070082

ВВЕДЕНИЕ

Оценка напряженно-деформированного состояния действующих трубопроводов является важной и давно изучаемой проблемой [1—4]. Напряженно-деформированное состояние каждой единицы объема трубы можно описать двумя составляющими тензора механических напряжений: осевой и кольцевой. Основным фактором, вызывающим кольцевые напряжения в действующем трубопроводе, является внутреннее давление [5, 6]. Большие кольцевые напряжения могут привести к разрушению объекта, особенно при присутствии в стенке трубы дефекта. Поэтому существует необходимость в определении местоположения наиболее опасных концентраторов напряжений в трубе при действии в ней внутреннего давления [1, 7].

Цель работы — определить взаимосвязь магнитных характеристик с напряженно-деформированным состоянием участков магистральных трубопроводов при гидро- и пневмоиспытаниях.

ОБЪЕКТЫ КОНТРОЛЯ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Гидроиспытания проводились на двух изначально одинаковых трубах из стали класса прочности К80 (Х100) с внешним диаметром 1220 мм и толщиной стенки 20 мм. На первой трубе измерения проводились до испытания без давления и при давлении 20 кгс/см², которое вызывало напряжения, не превышающие предел упругости. Во второй трубе был создан искусственный дефект (типа надрез) продольного шва посередине трубы (сеч. 2 на рис. 1 и 2). На этой трубе проводились гидроиспытания вплоть до разрыва, а измерения магнитных характеристик проводились до испытания и после разрыва.

Пневмоиспытание проводилось на трубе из стали класса прочности К70 с внешним диаметром 1440 мм и толщиной стенки 36 мм, на которой по продольному сварному шву был создан надпил глубиной в половину толщины стенки.

Магнитные измерения проводились с помощью мобильной аппаратно-программной системы DIUS-1.21M [8]. При измерении магнитных характеристик прибор устанавливался на внешнюю поверхность объекта контроля таким образом, чтобы перемагничивание и измерение происходило вдоль направления хода трубы (по оси) и поперек хода трубы (по кольцу).

Зоны контроля первой трубы находились на пересечении трех поперечных сечений и трех продольных сторон (на 3, 9, 12 ч) до испытания при отсутствии внутреннего давления в трубе, а во время гидроиспытания при давлении 20 кгс/см² — трех поперечных сечений и пяти сторон (на 1,5; 3; 9; 10,5 и 12 ч). Зоны контроля второй трубы располагались возле продольного сварного шва. На трубе для пневмоиспытания измерения проводились на расстоянии 50 мм от надпила.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По полученным результатам измерений магнитных характеристик первой трубы из стали К80 были построены карты распределения коэрцитивной силы H_c и остаточной магнитной индукции B_r по поверхности трубы, показанные на рис. 1 и 2.

При гидроиспытании воздействие внутреннего давления на стенки трубы вызывает в них напряжения двустороннего растяжения [4, 9]: осевые и кольцевые напряжения. Осевые напряжения направлены вдоль оси трубопровода, а кольцевые — поперек. Причем кольцевые напряжения по теории [4, 9] в два раза больше осевых.

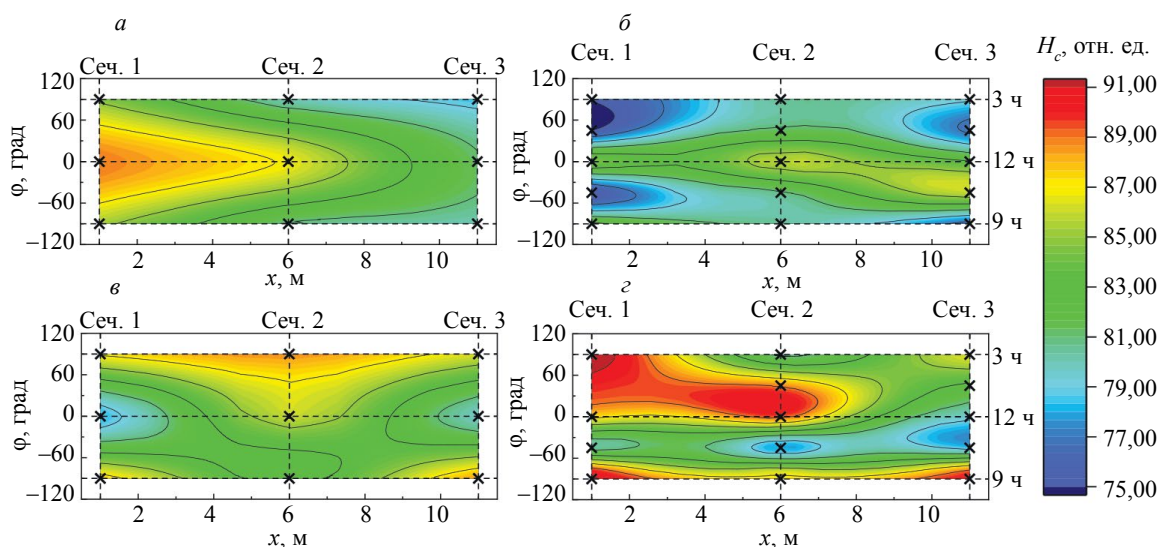


Рис. 1. Распределение коэрцитивной силы по трубе до гидроиспытания (а, в) и во время гидроиспытания (б, г), измеренной по оси (а, б) и по кольцу (в, г); × — точки, в которых проводились измерения.

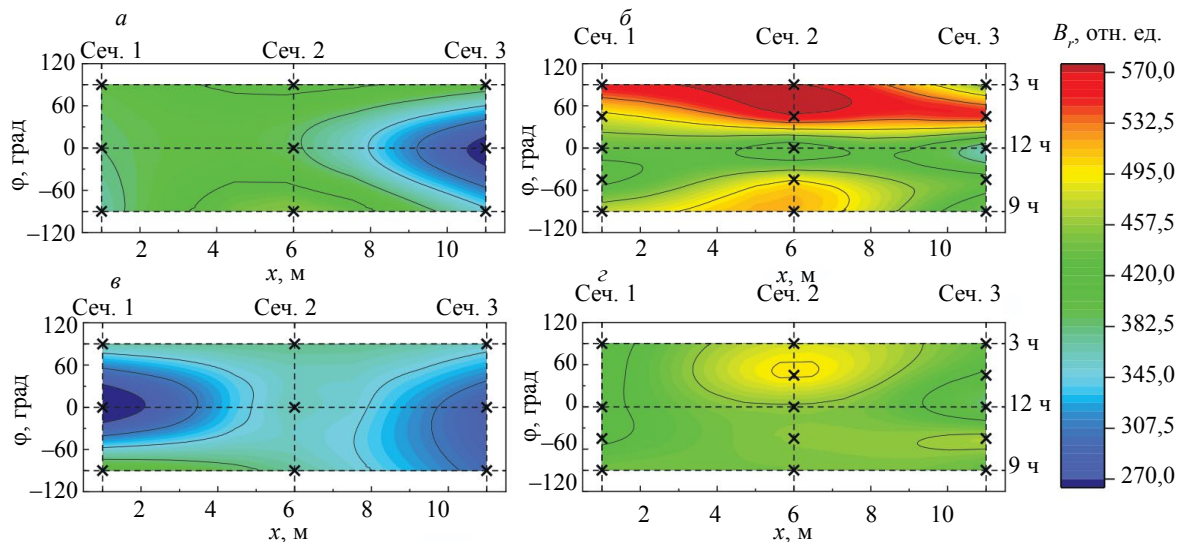


Рис. 2. Распределение остаточной магнитной индукции по трубе до гидроиспытания (*а, в*) и во время гидроиспытания (*б, г*), измеренной по оси (*а, б*) и по кольцу (*в, г*); × — точки, в которых проводились измерения.

Как видно по рис. 1, коэрцитивная сила H_c при воздействии давления изменилась неоднозначно, что затрудняет использование коэрцитиметрии в определении напряженно-деформированного состояния разных зон трубы. Согласно рис. 2, значения остаточной магнитной индукции B_r увеличились во всех зонах трубы при измерениях как по оси, так и по кольцу, что говорит о возникновении во всей трубе кольцевых и осевых растягивающих напряжений. Отсутствие падения B_r во всех зонах говорит о том, что эти напряжения не являются критически опасными (т.е. не являются близкими к пределу прочности) [10, 11]. Однако для определения зон с напряжениями, вызывающими слабые пластические деформации, одной лишь остаточной магнитной индукции недостаточно из-за неоднозначного изменения этой характеристики [11], что требует проведения дальнейших исследований.

На рис. 3 показано распределение магнитных характеристик, измеренных на второй трубе из стали К80 возле места разрушения. Координата $\varphi = 0$ соответствует продольному шву, по которому и произошло разрушение трубы.

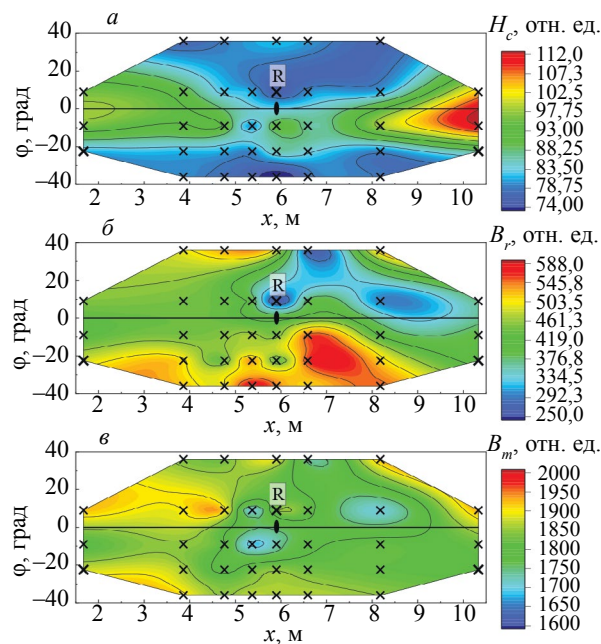


Рис. 3. Распределение коэрцитивной силы (*а*), остаточной (*б*) и максимальной (*в*) магнитной индукции по трубе после разрушения в результате гидроиспытаний, измеренных по направлению оси; — сварной шов; × — точки, в которых проводились измерения.

Из рис. 3 видно, что характеристики H_c и B_r после разрушения имеют большой разброс. Значения H_c находились в диапазоне от 70,2 до 111,9, а B_r — от 250,5 до 587,7. Наименьшее значение B_r находится в точке R, которая расположена близко к месту нанесения искусственного дефекта. Этой точке также характерно пониженное значение H_c . Точке R соответствует место наибольшего изгиба трубы после разрушения.

Карты распределения, полученные по результатам измерений магнитных характеристик на трубе из стали К70, показаны на рис. 4 и 5.

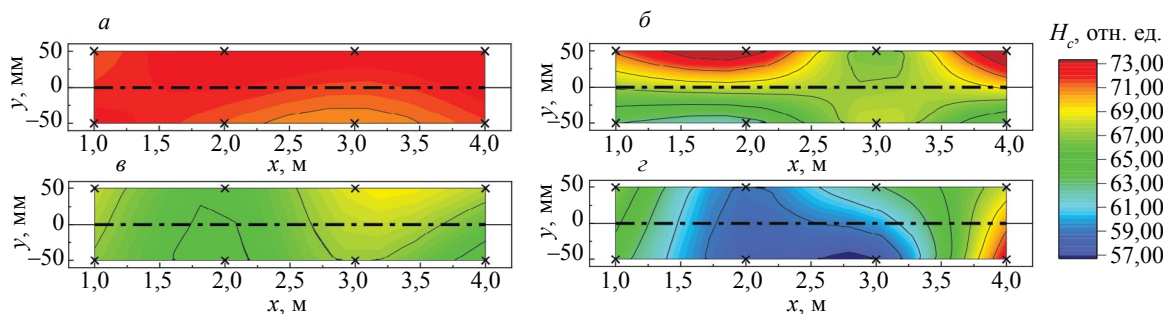


Рис. 4. Распределение коэрцитивной силы по трубе-инициатору до пневмоиспытания (а, в) и после разрушения (б, з), измеренной по оси (а, б) и по кольцу (в, з); — • — надпил; × — точки, в которых проводились измерения.

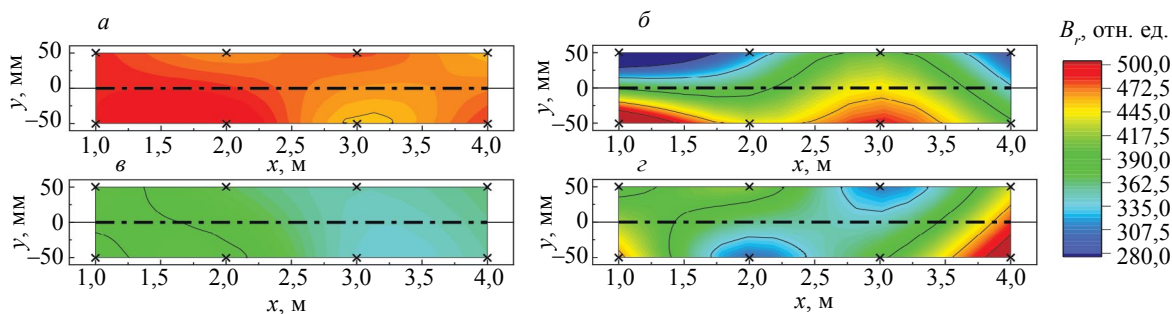


Рис. 5. Распределение остаточной магнитной индукции по трубе-инициатору до пневмоиспытания (а, в) и после разрушения (б, з), измеренной по оси (а, б) и по кольцу (в, з); — • — надпил; × — точки, в которых проводились измерения.

По рис. 4 и 5 обнаружено, что H_c и B_r , полученные вдоль оси, до испытания находились в диапазоне от 70,6 до 73 и от 455 до 498,5 отн. ед., а после разрушения — от 62,1 до 75,7 и от 280 до 568 отн. ед. А вдоль кольца эти же характеристики до испытания находились в диапазоне от 64 до 68,7 и от 342,5 до 400,5 отн. ед., а после разрушения от 56,8 до 72,9 и от 302,3 до 532,3 отн. ед. То есть вследствие разрушения сильно увеличился разброс магнитных характеристик как по оси, так и по кольцу, в большинстве точек характеристики изменились в сторону уменьшения. Аналогичный разброс характеристик виден возле области разрыва на трубе, разрушенной в результате гидроиспытания (см. рис. 3).

ВЫВОДЫ

Сложный характер разрушения трубы внутренним давлением показал существенный разброс магнитных характеристик, но при присутствии точечного инициатора разрушения, в данном случае надреза продольного сварного шва, возле этого инициатора возникает зона сильных изгибающих деформаций, сопровождающаяся значительным уменьшением коэрцитивной силы и остаточной магнитной индукции.

Установлено, что при слабом внутреннем давлении индикатором повышения растягивающих напряжений является остаточная магнитная индукция, но для определения напряжений

одной лишь остаточной магнитной индукции недостаточно, для обеспечения достоверного контроля напряжений необходимо проводить многопараметровый неразрушающий контроль.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Диагностика», № 122021000030-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агинеи Р.В. Разработка методики оценки напряженного состояния нефтегазопроводов по коэрцитивной силе металла: специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» / Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ухта, 2005. 21 с.
2. Попов Б.Е., Левин Е.А., Котельников В.С., Безлюдько Г.Я., Долинский В.М., Зарудный А.В. Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением // Безопасность труда в промышленности. 2001. № 3. С. 27—36.
3. Кулак С.М., Новиков В.Ф., Пробыток В.В., Ваценок С.М., Фурсов Е.С. Магнитный контроль напряженного состояния стенки газового сепаратора при его гидроиспытаниях // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 38—45.
4. Игнатик А.А. Расчетно-экспериментальная оценка напряженного состояния трубопровода под воздействием изгибающей нагрузки и внутреннего давления // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2021. № 2 (146). С. 114—126.
5. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 60 с.
6. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. М.: Госстрой, 2013. 93 с.
7. Arumugam T., Mohamad Rosli M.K.A., Karuppanan S., Ovinis M., Lo M. Burst capacity analysis of pipeline with multiple longitudinally aligned interacting corrosion defects subjected to internal pressure and axial compressive stress // SN Appl. Sci. 2020. V. 2 (1201). P. 1—11.
8. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 47—53.
9. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов / Учеб. для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
10. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Мушников А.Н., Смирнов С.В., Якушенко Е.И. Влияние механических напряжений на магнитные характеристики трубной стали // Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т. 55. № 3 (325). С. 181—191.
11. Костин В.Н., Царькова Т.П., Ничипурук А.П., Лоскутов В.Е., Лопатин В.В., Костин К.В. Необратимые изменения намагниченности как индикаторы напряженно-деформированного состояния ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2009. № 11. С. 54—67.

REFERENCES

1. Aginei R.V. Development of a methodology for estimating the stressed state of oil and gas pipelines by the coercive force of metal: specialty 25.00.19 “Construction and operation of oil and gas pipelines, bases and storages” / abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Ukhta, 2005, 21 p.
2. Popov B.E., Levin E.A., Kotelnikov V.S., Bezlyud'ko G.Ya., Dolinsky V.M., Zarudnyi A.V. Magnetic control of stress-strain state and residual resource of pressure vessels // Occupational Safety in Industry. 2001. No. 3. P. 27—36.
3. Kulak S.M., Novikov V.F., Probotyuk V.V., Vatsenkov S.M., Fursov, E.S. Magnetic testing of stressed state of hydrotested gas-separator wall // Defectoskopiya. 2019. No. 3. P. 38—45.
4. Ignatik A.A. A computational and experimental assessment of the pipeline stress state under bending load and internal pressure // Oil and Gas Studies. 2021. No. 2 (146). P. 114—126.
5. SNiP (Building Codes and Regulations) 2.05.06-85. Trunk pipelines, Moscow: FGUP TSPP, 2005, 60 p.
6. SP (Set of Rules) 36.13330.2012. Trunk pipelines. Moscow: Gosstroy, 2013. 93 p.
7. Arumugam T., Mohamad Rosli M.K.A., Karuppanan S., Ovinis M., Lo M. Burst capacity analysis of pipeline with multiple longitudinally aligned interacting corrosion defects subjected to internal pressure and axial compressive stress // SN Appl. Sci. 2020. V. 2 (1201). P. 1—11.
8. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Byzov A.V. DIUS-1.15M Mobile Hardware-Software Structuroscopy System // Defectoskopiya. 2018. No. 9. P. 47—53.
9. Feodosiev V.I. Strength of Materials: Textbook for Higher Education Institutions. 10th edition, revision and additions. Moscow: Bauman MSTU, 1999. 592 p.
10. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Mushnikov A.N., Smirnov S.V., Yakushenko E.I. Effect of mechanical stresses on the magnetic characteristics of pipe steel // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2014. V. 55. No. 3. P. 530—538.
11. Kostin V.N., Tsar'kova T.P., Loskutov V.E., Kostin K.V., Nichipuruk A.P., Lopatin V.V. Irreversible changes in the magnetization as indicators of stressed-strained state of ferromagnetic objects // Defectoskopiya. 2009. No. 11. P. 54—67.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ РАСЧЕТА МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ

© 2024 г. К.В. Гоголинский^{1,*}, А.С. Уманский^{2,**}, А.С. Голев^{3,***},
К.И. Доронин^{2,****}, К.А. Томский^{4,*****}

¹НИИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ, Россия 188300 г. Гатчина, мкр. Орлова роща, 1

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
Россия 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

³ООО «КОНСТАНТА», Россия 198097 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21

⁴ООО «НТП»ТКА», Россия 192289 Санкт-Петербург,

Грузовой проезд, 33, корп. 1, литер Б

E-mail: *nanoscan@yandex.ru; **refreshermd@gmail.com; ***artemgolev1999@gmail.com;

****doronin.k.i@mail.ru; *****tka46@mail.ru

Поступила в редакцию 02.06.2024; после доработки 20.06.2024

Принята к публикации 21.06.2024

Представлены результаты сравнительного анализа трех способов расчета модуля упругости при динамическом инструментальном индентировании: в соответствии с ГОСТ Р 56474, ГОСТ Р 8.748 и предложенным оригинальным оптическим способом, основанным на анализе геометрических параметров отпечатка, с использованием подготовленных образцов сплавов 20Х25Н20С2, 20Х23Н18 и БрАНЖНМц9-4-4-1.

Ключевые слова: метод динамического инструментального индентирования, динамическое индентирование, инструментальное индентирование, модуль упругости, твердость, механические свойства.

ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE MODULE OF ELASTICITY DURING DYNAMIC INSTRUMENTAL INDENTATION

© 2024 K.V. Gogolinskii^{1,*}, A.S. Umanskii^{2,**}, A.S. Golev^{3,***}, K.I. Doronin^{2,****},
K.A. Tomskey^{4,*****}

¹NRC "Kurchatov Institute" — PINP, Russia 188300 Gatchina, m-rayon Orlova roshcha, 1

²Saint Petersburg Mining University, Russia 199106 St Petersburg, 21st Line, 2

³ООО«CONSTANTA», Russia 198097 St Petersburg, Ogorodnyj pereulok, 21

⁴TKA Scientific Instruments LLC, Russia 192289 St Petersburg, Freight passage, 33

E-mail: *nanoscan@yandex.ru; **refreshermd@gmail.com; ***artemgolev1999@gmail.com;

****doronin.k.i@mail.ru; *****tka46@mail.ru

The results of a comparative analysis of three methods for calculating the elastic modulus during dynamic instrumental indentation are presented: in accordance with GOST R 56474, GOST R 8.748 and the proposed original method based on data from optical analysis of the indentation using prepared samples of alloys 20X25H20C2, 20X23H18 and BrANZhNMts9-4-4-1.

Keywords: dynamic instrumented indentation method, dynamic indentation, instrumented indentation, elastic modulus, hardness, mechanical properties.

DOI: 10.31857/S0130308224070098

ВВЕДЕНИЕ

Определение соответствия механических характеристик материала указанным в нормативной документации на продукцию, является неотъемлемой частью производственного процесса. При оценке свойств, характеризующих упругопластические деформации, используют различные параметры, в том числе твердость и модуль упругости материала. Их определение чаще связано с классическими испытаниями на твердость по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, методу инструментального индентирования (ИИ) и т.д., а также разрушающими испытаниями, требующими подготовки специальных образцов. С развитием современных средств неразрушающего контроля активно развиваются методы испытаний материалов, основанные на динамическом индентировании. Метод динамического инструментального индентирования (ДИИ), основанный на определении свойств материалов по анализу процесса контактно-ударного взаимодействия падающего индентора с поверхностью испытуемого образца, потенциально позволяет определять модуль упругости материала, что, в свою очередь, позволит производить оценку свойств в целях диагностирования состояния изделий. Однако для этого необходима корректная

обработка сигналов измерительных преобразователей с учетом применяемых способов количественного расчета по диаграмме контактное усилие — глубина внедрения. Исследование проводилось в рамках работы по совершенствованию метода ДИИ и разработки прибора для безобразцового неразрушающего контроля механических свойств материалов и изделий [1, 2].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБРАЗЦЫ

Для получения численных значений модуля упругости E_{IT} при анализе диаграмм контактное усилие — глубина внедрения $P(h)$ рассматривается 3 способа расчета: в соответствии с ГОСТ Р 8.748 [3], в соответствии с ГОСТ Р 56474 [1, 4], а также с использованием предлагаемого оптического способа, основанного на анализе геометрических параметров отпечатка (рис. 2), получаемого в при динамическом индентировании. Основное различие данных способов — определение значения точки пересечения касательной h_r : метод ДИИ предполагает его определение с использованием рассчитываемой касательной к кривой разгрузки $P(h)$ в точке максимальной испытательной нагрузки F_{max} , а метод ДИ использует остаточную глубину отпечатка h_p и максимальную глубину внедрения h_{max} [1, 4].

На рис. 1 представлена диаграмма контактное усилие — глубина внедрения для способа ИИ.

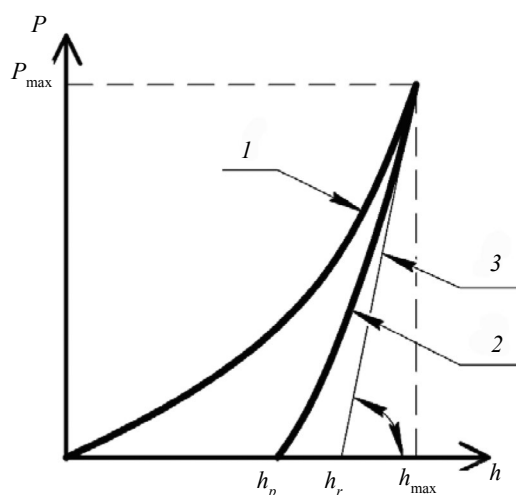


Рис. 1. Диаграмма контактное усилие — глубина внедрения для способа ИИ: 1 — кривая нагружения; 2 — кривая разгрузки; 3 — касательная к кривой 2 при F_{max} .

При оптическом расчете параметров ударно-контактного взаимодействия определение проекционной площади A_p и контактной глубины h_c производится на основании отпечатка с помощью оптического микроскопа (рис. 2б). Предполагается, что хорда AB на рис. 2а является диаметром отпечатка, полученного при воздействии сферического индентора радиуса R с исследуемой поверхностью.

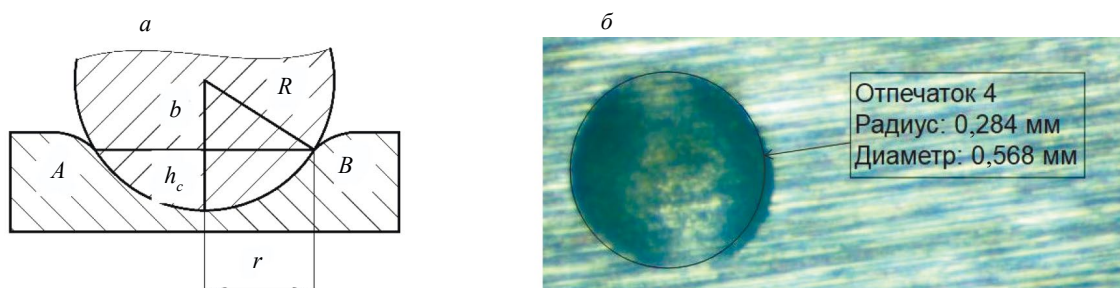


Рис. 2. Параметры отпечатка при индентировании: а — упрощенное изображение продольного сечения зоны отпечатка и индентора; б — фотография получаемого отпечатка.

Основные соотношения, используемые для расчета параметров отпечатка, параметров диаграмм контактное усилие — глубина внедрения и модуля упругости по трем способам представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные соотношения, используемые для расчета параметров отпечатка, параметров диаграмм контактное усилие — глубина внедрения и модуля упругости по трем способам

№	Параметр	ДИИ	ДИ	Оптический
1	Точка пересечения касательной h_p , мм	Исходя из проведения касательной	$h_r = h_{\max} - \frac{2 \cdot (h_{\max} - h_p)}{3}$	$h_r = h_{\max} - \frac{(h_{\max} - h_c)}{\varepsilon},$ $\varepsilon = 3/4$
2	Глубина прогиба контура отпечатка h_s , мм	—	$h_s = k \cdot h_e = \varepsilon \cdot (h_{\max} - h_p),$ $\varepsilon = 0,5$	—
3	Контактная глубина h_c , мм	$h_c = h_{\max} - \varepsilon \cdot (h_{\max} - h_r),$ $\varepsilon = 3/4$	$h_c = h_{\max} - h_s$	$h_c = R - b;$ $b = \sqrt{R^2 - r^2};$ $R = 1,5$
4	Площадь проекции A_p , мм ²	$A_p = \pi \cdot r^2;$ $r = \sqrt{R^2 - b^2};$ $b = R - h_c$	$A_p = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_c$	$A_p = \pi \cdot r^2$
5	Контактная жесткость S , Н/мм		$S = \frac{dP}{dh};$ $dP = P_{\max};$ $dh = h_{\max} - h_r$	
6	Приведенный модуль упругости E_r , Н/мм ²		$E_r = \frac{S \cdot \sqrt{\pi}}{2 \cdot \sqrt{A_p}}$	
7	Модуль упругости E_{IT} , Н/мм ²		$E_{IT} = \frac{1 - (v_s)^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - (v_i)^2}{E_i}}$	

В табл. 1 представлены следующие переменные: ε — поправочный коэффициент для различных инденторов; h_e — упругая составляющая глубины вдавливания индентора, мм; v_s — коэффициент Пуассона материала испытуемого образца; v_i — коэффициент Пуассона материала индентора; E_i — модуль упругости материала индентора, Н/мм².

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительные исследования проводились с использованием трех материалов: сталей 20X25H20C2 и 20X23H18 твердостью 319 HV0,2 и 189 HV0,2, соответственно, а также сплава безоловянной бронзы БрАНЖНМц9-4-4-1 твердостью 134 HV0,2, соответствующими по своим геометрическим параметрам и массе требованиям [5]. При этом, сигнал модифицированного преобразователя Либя для реализации метода ДИИ [2], записанный с частотой 15 МГц с помощью осциллографа Keysight Technologies DSOX2002A, обрабатывался с использованием программы в пакете MATLAB для построения зависимостей $P(h)$ для трех образцов (рис. 3).

Рассчитанные для образцов значения модуля упругости представлены в табл. 2.

Было установлено, что результаты расчета модуля упругости оптическим способом существенно зависят от погрешности измерения радиуса отпечатка на испытуемом образце. При анализе отпечатков выявлено, что увеличение относительной погрешности измерения радиуса

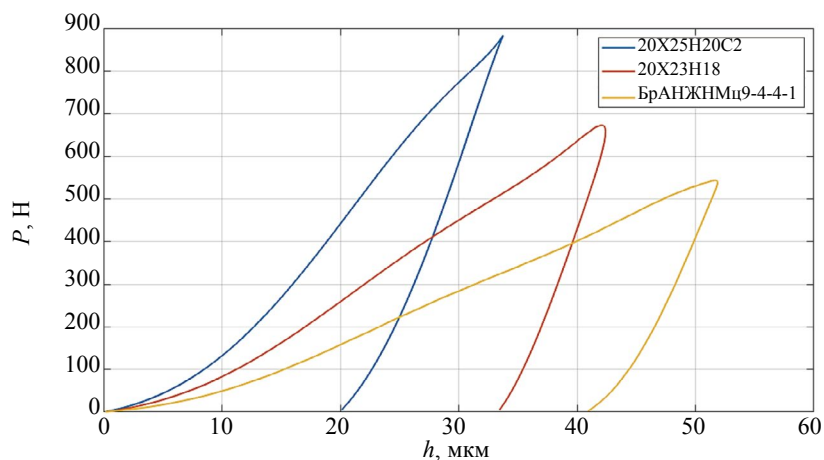


Рис. 3. Рассчитанные диаграммы контактное усилие — глубина внедрения для образцов сплавов 20X25H20C2, 20X23H18 и БрАНЖНМц9-4-4-1.

Таблица 2

Значения модуля упругости E_{IT} для образцов сплавов 20X25H20C2, 20X23H18 и БрАНЖНМц9-4-4-1, ГПа

Материал	ИИ	ДИИ	Оптический	Справочное
20X25H20C2	154	181	148	206
20X23H18	132	176	234	206
БрАНЖНМц9-4-4-1	78	91	62	106

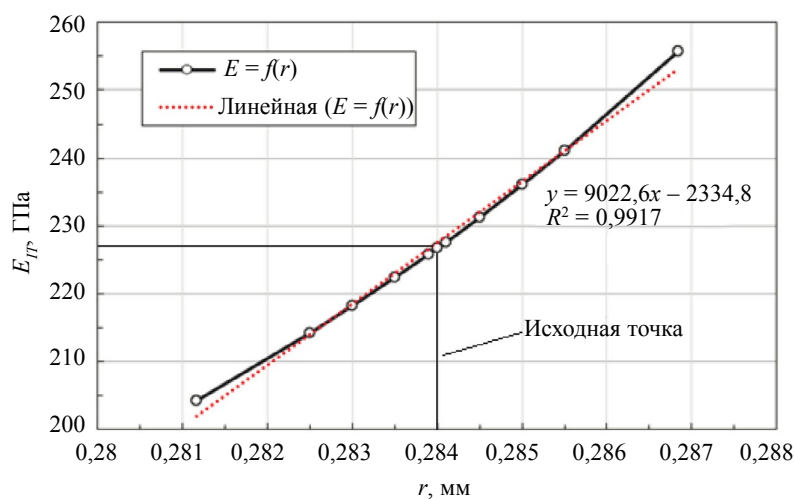


Рис. 4. Зависимость рассчитанного модуля от измеренного радиуса.

на 1 % вызывает ошибку расчета модуля упругости на 12 %. Зависимость результатов расчета модуля упругости при индентировании от погрешности измерения радиуса отпечатка представлена на рис. 4.

ВЫВОДЫ

Применение способа ДИИ по ГОСТ Р 56474 обеспечивает наиболее близкий результат измерения модуля упругости к справочным значениям (с отклонением 13—15 %). Применение способов ИИ по ГОСТ Р 8.748 и предложенного оптического демонстрируют погрешности измерения порядка 25—36 % и 14—28 % соответственно.

Характер зависимости области перехода от нагружения к разгрузению для диаграмм контактное усилие — глубина внедрения (см. рис. 3) зависит от материала и соотношения значений модуля упругости к твердости, что может приводить к дополнительной погрешности при использовании описанных способов измерения модуля упругости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крень А.П., Протасеня Т.А. Определение физико-механических характеристик изотропного пирографита по параметрам динамического индентирования // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 51—59.
2. Umanskii A.S., Gogolinskii K.V., Syasko V.A., Golev A.S. Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method // Inventions. 2022. 7. DOI: 10.3390/inventions7010029
3. ГОСТ Р 8.748—2011 (ИСО 14577-1:2002) Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик металлов при инструментальном индентировании.
4. ГОСТ Р 56474—2015. Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. Общие требования.
5. ГОСТ Р 8.969—2019 Металлы и сплавы. Определение твердости по шкалам Либа — Часть 1. Метод измерений.

REFERENCES

1. Kren A.P., Protasenyia T.A. Determination of the physic and mechanical characteristics of isotropic pyrolytic graphite by dynamic indentation method // Defectoskopya. 2014. No. 7. C. 51—59.
2. Umanskii A.S., Gogolinskii K.V., Syasko V.A., Golev A.S. Modification of the Leeb Impact Device for Measuring Hardness by the Dynamic Instrumented Indentation Method // Inventions. 2022. V. 7. DOI: 10.3390/inventions7010029
3. GOST R 8.748—2011 (ISO 14577-1:2002) Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Test method.
4. GOST R 56474—2015. Space systems. Non-destructive testing of physics and mechanical properties of space technique's materials and coatings by dynamic indentation. General requirements.
5. GOST R 8.969—2019 State system for ensuring the uniformity of measurements. Metals and alloys. Leeb hardness test. Part 1: Test method.

XI Международная научно-техническая конференция «Инновации в машиностроении»



УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!

Приглашаем вас принять участие в XI Международной научно-технической конференции «ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ», которая состоится 4—5 сентября 2024 г. на базе Объединенного института машиностроения НАН Беларуси.

04.09.2024 — ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ И МЕРОПРИЯТИЯ КУЛЬТУРНОЙ ПРОГРАММЫ
05.09.2024 — СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ

Секции конференции:

Секция 1. Проектирование, испытания машин и их компонентов;

Секция 2. Динамика, надежность, ресурс машин и их компонентов;

Секция 3. Машиностроительные материалы и технологии.

В рамках конференции будет проведен Конкурс молодых ученых и студентов на лучший научный доклад.

В период работы форума будет открыта выставка образцов инновационной техники и их компонентов, а также выставка новинок научно-технической литературы Республиканской научно-технической библиотеки.

Организаторы конференции:

Национальная академия наук Беларуси
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси.

Информационный партнер:

Холдинг 1AK-GROUP — белорусский производитель аккумуляторных батарей и центр научно-технических компетенций в области хранения и накопления энергии.



Уважаемые коллеги!

Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике приглашает Вас принять участие в

**ХII Международном промышленном форуме
Территория NDT 2025. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика**

Форум является крупнейшим ежегодным событием в сфере неразрушающего контроля. Самые передовые технологии, новейшее оборудование, лучшие решения для промышленности представят крупнейшие отечественные компании.

Напомним, что в 2024 году в Форуме приняли участие **57 отечественных и зарубежных компаний**, за три дня мероприятие посетило более **2500 тысяч человек** — руководители компаний, начальники лабораторий, ведущие специалисты, инженеры из различных отраслей деятельности

В рамках подготовки к Форуму у Вас есть возможность выбрать наилучшие места для стенда Вашей компании по выгодным условиям.

В 2025 году на Форуме пройдет **финальный этап Всероссийского конкурса по неразрушающему контролю «Дефектоскопист 2025»**. За звание лучшего дефектоскописта будут бороться специалисты из различных регионов страны.

Также на Форуме состоится вручение ежегодной **Национальной премии по неразрушающему контролю в двух номинациях**:

Премия за выдающийся вклад в развитие способов и технологий НК, разработку новых приборов и систем НК и ТД.

Премия молодому специалисту (до 35 лет) за достижения в области НК и ТД.

В соответствии с Положением о Национальной премии лауреатам вручаются памятные значки, дипломы и денежная премия от РОНКТД и спонсоров.

На **Молодежной научно-технической конференции** молодые специалисты представят свои разработки.

На Форуме в 4-й раз пройдет **конкурс выпускных квалификационных работ «Новая генерация»**. Студенты крупнейших технических вузов страны презентуют свои работы, а лауреаты конкурса получают ценные призы и памятные подарки.

Форум проходит в одно время с **Международной выставкой «Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса»** и **Национальным нефтегазовым форумом**.

Ждем Вас 14—16 апреля 2025 г. в Москве, ЦВК Экспоцентр, павильон 2.6. Успейте забронировать стенд по выгодной цене!