



ISSN 0130-3082

Российская Академия наук

Дефектоскопия



Неразрушающий контроль

Техническая диагностика

Анализ материалов

№ 8

2024



НАУКА

— 1727 —

ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Журнал ежемесячный
 Основан в феврале 1965 года
 Екатеринбург

№ 8
 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Акустические методы

А.А. Хлыбов, А.Л. Углов, Д.А. Рябов. Разработка способа оценки степени наводороживания титанового сплава VT1-0 акустическим методом 3

Электрические методы

В.В. Ларионов, Р.С. Лаптев, А.М. Лидер. Слоистые композиционные гидрированные пленки из циркония и ниобия: способ получения и контроль методом термоэдс (термоэлектрический метод) 21

Тепловые методы

Хао Янг, Ян Ян, Ксианлонг Лиу, Хонжин Ванг, Ююн Хоу, В.П. Вавилов. Оценка эффективности обнаружения инородных объектов в почве методом инфракрасной термографии 32

Электромагнитные методы

А.Е. Горбунов, П.В. Соломенчук, А.С. Уманский. Моделирование двухэлементного вихретокового преобразователя тангенциального типа с активным экранированием для контроля паяных соединений 42

Другие методы дефектоскопии

А.Н. Тиратурян. Обратный расчет модулей упругости элементов слоистых сред на основе анализа динамического деформирования (на примере автомобильных дорог) 52

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

А.В. Бызов, О.Н. Василенко, Д.Г. Ксенофонтов, М.Г. Минин, И.А. Вайнштейн. Особенности процесса цементации сталей при изготовлении градуировочных образцов для вихретокового структуроскопа 62

Д.Г. Ксенофонтов, О.Н. Василенко, В.Н. Костин, Н.П. Лукиных. Определение факторов, влияющих на воспроизводимость результатов измерений в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание» 67

Д.И. Антонов, М.С. Степанова, А.С. Мусихин, В.А. Сясько, К.А. Томский. Обеспечение достоверности автоматизированного импульсного электроискрового контроля покрытий труб в поточном производстве 71

Информация 76

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ НАВОДОРОЖИВАНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT1-0 АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

© 2024 г. А.А. Хлыбов^{1,*}, А.Л. Углов¹, Д.А. Рябов^{1,**}

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

Поступила в редакцию 11.04.2024; после доработки 09.07.2024
Принята к публикации 12.07.2024

Исследованы возможности применения неразрушающего акустического метода для определения степени наводороживания титанового сплава VT1-0. Проанализированы особенности использования различных акустических параметров для построения расчетно-экспериментальных способов определения пористости титанового сплава на различных этапах его наводороживания. Проанализированы источники погрешностей предлагаемых способов, границы их применимости, а также требования к аппаратно-программным средствам их реализации. Результаты акустических измерений, проведенных на образцах из сплава VT1-0, сопоставлены с представлениями о закономерностях его структурных изменений в процессе наводороживания. Показана возможность создания на базе полученных экспериментальных данных инженерных алгоритмов оценки состояния материала изделий, подвергаемых наводороживанию, с целью недопущения опасной деградации его эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: титан, водородное охрупчивание, деградация структуры, структурный шум, акустический контроль.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSING THE DEGREE OF HYDROGENATION OF TITANIUM ALLOY VT1-0 BY ACOUSTIC METHOD

© 2024 A.A. Khlybov^{1,*}, A.L. Uglov¹, D.A. Ryabov^{1,**}

¹NNSTU n. a. R. E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia
E-mail: *hlybov_52@mail.ru; **riabov.da@nntu.ru

In this paper, the possibilities of using a non-destructive acoustic method to determine the degree of hydrogenation of titanium alloy VT1-0 are investigated. The features of the use of various acoustic parameters for the construction of engineering techniques for determining the structural state of a titanium alloy at various stages of its hydrogenation are analyzed. A number of computational and experimental methods for determining the mass fraction of hydrogen in a titanium alloy are proposed, based on the use of its acoustic characteristics, which increase the accuracy and stability of the algorithms underlying the calculation part of the methods. The sources of errors of the proposed methods, the limits of their applicability, as well as the requirements for hardware and software for their implementation are analyzed. The results of acoustic measurements carried out on samples from the VT1-0 alloy are compared with the ideas about the patterns of its structural changes during its hydrogenation. The possibility of creating engineering algorithms for assessing the state of the material of products subjected to hydrogenation on the basis of experimental data obtained in order to prevent dangerous degradation of its operational properties is shown.

Keywords: titanium, hydrogen embrittlement, structure degradation, structural noise, acoustic control.

DOI: 10.31857/S0130308224080015

1. ВВЕДЕНИЕ

Для многих конструкционных металлических материалов наличие в их структуре соединений водорода оказывает существенное влияние на весь комплекс физико-механических свойств [1—3].

В частности, для гидридообразующих металлов, таких как титан и сплавы на его основе, водород — одна из самых вредных примесей. Малая растворимость водорода в α -фазе титана приводит к образованию гидридов (TiH_x) даже при небольших концентрациях внедренного водорода. Гидридные включения снижают ударную вязкость и пластичность металла, уменьшают его трещиностойкость. Степень деградации прочностных характеристик титана и его сплавов прямо зависит от содержания водорода. Поэтому задача контроля содержания водорода и дефектов структуры водородного происхождения является особенно актуальной. Таким образом, для ответственных технических объектов ядерной энергетики, химической промышленности и нефтегазовой отрасли [4, 5], а также для изделий, эксплуатируемых в водородосодержащих средах, необходима разработка новых и совершенствование существующих методов контроля наводороженного состояния материалов.

Для оценки структурной деградации материалов наиболее привлекательными являются методы неразрушающего контроля, среди которых для решения практических задач большой интерес представляют акустические методы [6—8].

В настоящее время не сформулированы достаточно надежные подходы к оценке степени наводороживания конструкционных материалов с использованием акустических методов. Это объясняется сложностью влияния соединений водорода на структуру материала и, как следствие, на его механические свойства, в том числе и акустические характеристики. В процессе наводороживания титанового сплава происходят сложные, немонотонные изменения морфологических особенностей его структуры, приводящие к разнонаправленным изменениям акустических параметров [1, 8]. Влияние наводороживания на важнейшие механические и эксплуатационные свойства может оказаться значительно сильнее, чем на акустические характеристики. Поэтому к информативности и чувствительности акустических методов контроля предъявляют повышенные требования. Этим объясняются попытки использования в качестве информативных не только прямые ультразвуковые параметры — скорость звука и коэффициент затухания [9—11], но и результаты обработки (корреляционной, спектральной, вейвлет- и др.) как распространяющихся сигналов, так и структурного шума (СШ) [12—14].

Наводороженная структура титанового сплава может быть представлена в виде структуры с определенным типом рассеянных повреждений (гидридов титана) [15]. Рассеянный ультразвуковой сигнал можно считать СШ, являющийся информативной характеристикой рассеянной водородной поврежденности исследуемого материала [16—18]. Одной из первых работ, в которой приведены экспериментально зарегистрированные осциллограммы обратно рассеянного сигнала на образцах с водородной поврежденностью, является [19]. Из работы следует, что амплитуда обратно рассеянного сигнала на частоте 10 МГц возрастает в 7—12 раз. Это позволяет использовать характеристики СШ для оценки степени наводороживания титанового сплава.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка способа неразрушающей оценки степени наводороживания титанового сплава на основе анализа спектрально-энергетических параметров акустического СШ.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материала для исследования выбран α -титановый сплав ВТ1-0. Образцы для исследования представляли собой пластины с размером 75×15 мм и толщиной 3 мм, вырезанные вдоль направления проката. Химический состав исследуемого сплава приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава ВТ1-0, мас. %

Материал	Al	Fe	Cr	Mn	Si	C	N	O	H	Ti
ВТ1-0	0,96	0,37	0,25	0,03	0,1	До 0,07	До 0,04	До 0,2	До 0,01	Ост.

Наводороживание образцов проводили в газовой среде методом Сивертса при температуре плюс 550°C и избыточном давлении водорода 0,01 МПа. Образцы выдерживали в установке наводороживания в течение 1, 3 и 5 ч для получения различных концентраций водорода в сплаве. Концентрацию водорода определяли методом высокотемпературной экстракции на приборе ELTRA ОН-800. Относительное среднее квадратичное отклонения измерения массовой доли водорода в титановых сплавах на данном приборе не превышает 10 %.

Для определения плотности исследуемого сплава после наводороживания от каждого образца были отрезаны образцы размером 15×15×3 мм. Плотность измеряли методом гидростатического взвешивания. Взвешивание производили на прецизионных аналитических весах ВЛА-200 при температуре окружающего воздуха 21 °С в соответствии с ГОСТ 20018—74.

Плотность образцов в г/см³ вычисляли по формуле:

$$\rho = \frac{m_1 \rho_1}{m_2}, \quad (1)$$

где m_1 — масса испытуемого образца, г; ρ_1 — плотность дистиллированной воды на воздухе, г/см³; m_2 — масса объема дистиллированной воды, вытесненной образцом, помещенным в дистиллированную воду, равная разности масс образца, взвешенного на воздухе, и образца, взвешенного в воде, г.

Металлографический анализ образцов проводили по стандартной схеме: шлифовка, полировка и последующее травление в растворе 60 мл Н₂О + 6 мл HF + 3 мл HNO₃. Изображения микроструктур получали с применением оптического металлографического микроскопа «SIAMS AT-24TRF».

Акустические измерения проводились с использованием измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН», обеспечивающего прецизионное измерение амплитудно-временных параметров акустических импульсов и программную обработку результатов в реальном масштабе времени. Погрешность измерения времени распространения упругих волн ± 1 нс. Толщину образцов измеряли с точностью 0,001 мм. При выполнении акустических измерений использовались прямые совмещенные пьезопреобразователи продольных и поперечных горизонтально поляризованных волн с номинальной частотой 5 МГц с пьезопластинами в форме квадрата со стороной 4 мм. Кроме того, использовались преобразователи поверхностных волн в форме двойного клина с жесткой базой и номинальной частотой 3 МГц. Измерения проводили не менее 5 раз в каждой точке контроля с последующей статистической обработкой.

3. АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАТИВНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

При разработке инженерных методик количественной оценки степени наводороживания материалов конструктивных элементов и деталей в условиях реальной эксплуатации следует учитывать два принципиальных ограничения: односторонний (как правило) доступ в зоне измерений и невозможность прецизионного измерения толщины в этой зоне. Отсюда следует, что скорость упругих волн (как один из физических параметров) имеет существенные ограничения при контроле наводороживания материала эксплуатируемых объектов. Скорость упругих волн применима лишь в случаях, когда ее изменение при изменении содержания водорода заметно превышает погрешность, с которой определена толщина, а это, как правило, не всегда выполняется.

Определение коэффициента затухания не требует высокой точности измерения толщины материала. Однако в силу необходимости определения амплитудных параметров упругих волн измерение коэффициента затухания обладает значительной погрешностью (свыше 10 %), что также сужает возможность использования этого параметра в реальных условиях.

Тем не менее скорость и затухание упругих волн фигурируют в существующих моделях (физических и феноменологических) и описывают влияние структуры и физико-механических свойств на характеристики распространения упругих волн в твердых телах. В рассматриваемой методике эти параметры будут использованы для построения искомых расчетно-экспериментальных методик количественного контроля степени наводороживания в материалах.

В данной статье для оценки степени наводороживания на примере титанового сплава ВТ1-0 предприняты попытки использования двух групп акустических параметров:

«временные» параметры многократно отраженных упругих импульсов, построенные на основании прецизионных измерений, которые, в частности, применяются для определения скорости звука;

спектральные характеристики как акустических сигналов, так и акустического СШ, возникающего при рассеянии сигнала на структурных неоднородностях, в том числе и вызываемых процессами образования гидридов при наводороживании.

3.1. Оценка степени наводороживания с использованием временных параметров упругих импульсов

Для разработки количественных способов контроля содержания водорода в исследуемом сплаве воспользуемся подходом, изложенным в работе [20], посвященной контролю пористости деталей из порошковой стали спектрально-акустическим методом. В этой работе на феноменологическом уровне в рэлеевском приближении рассмотрены закономерности трансформации спектра упругого импульса с гауссовой огибающей [20], распространяющегося в наводороженном материале, может быть представлена:

$$S(t, 0) = Ae^{-kt^2} \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (2)$$

где A , k — постоянные материала; ω_0 — круговая частота несущей импульса; φ_0 — начальная фаза; t — время.

В результате исследований влияния степени наводороживания на плотность титанового сплава ВТ1-0 было получено, что с ростом концентрации водорода плотность сплава снижается (разуплотнение). Результаты представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что связь концентрации водорода со степенью разуплотнения $\Delta\rho = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}$

практически функциональная: зависимость $\Delta\rho(H)$ является прямо пропорциональной с коэффициентом детерминации 0,9989.

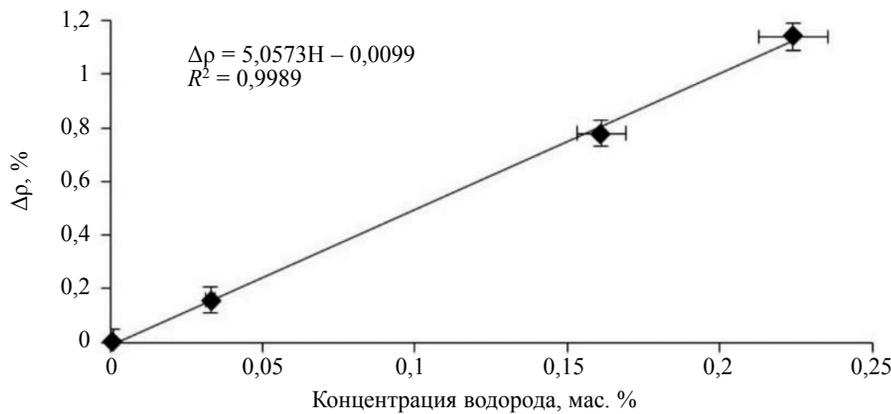


Рис. 1. Влияние концентрации водорода на разуплотнение сплава ВТ1-0.

В настоящее время понятие поврежденность (как физически измеряемая величина) включает в себя много интерпретаций. Например, плотность микротрещин, пор, дислокаций и т.д. Также в качестве меры поврежденности может быть использовано изменение плотности материала. Учитывая полученные на рис. 1 результаты, практически линейная зависимость плотности исследуемого сплава от концентрации водорода в нашей работе будем считать, что повышение содержания водорода также является мерой поврежденности материала. Тогда, с учетом полученных результатов и отмеченной выше трактовки поврежденности как меры разуплотнения можем считать, что связь концентрации водорода H с фазовой скоростью и коэффициентом затухания волн мегагерцового диапазона описывается формулами:

$$\alpha(\omega) = (k_1 + k_2 H)\omega^4; \quad (3)$$

$$V(\omega) = V_0(1 - k_3 H - k_4 H\omega^2), \quad (4)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 — постоянные материала.

Следует заметить, что соотношения (3), (4) справедливы для диапазонов значений содержания водорода, внутри которых механизм изменения морфологии структуры сплава не претерпевает резких изменений.

Форма импульса $S(t, x)$, прошедшего расстояние x в наводороженном материале, определяется с помощью обратного преобразования Фурье:

$$S(t, x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega, 0) K_M(\omega, x) e^{j\omega t} d\omega, \quad (5)$$

где $F(\omega, 0)$ — спектр импульса на входе в материал; $K_M(\omega, x)$ — передаточная функция материала, рассматриваемого как акустический четырехполюсный преобразователь, которую можно записать в виде:

$$K_i(\omega, x) = \exp\left[-\alpha(\omega)x - j\frac{\omega x}{V(\omega)}\right], \quad (6)$$

а x — акустический путь упругого импульса.

Выражения для частотно зависимых коэффициента затухания $\alpha(\omega)$ и скорости $V(\omega)$ для микронеоднородного материала в рамках широко используемой в настоящее время механики сред с повреждениями принято связывать с величиной поврежденности Ψ , которую часто связывают с разуплотнением материала вследствие трещинообразования или других повреждающих факторов.

Для исследований образцы вырезали из листового проката, который, с точки зрения характеристик упругой анизотропии, относится к ортотропным материалам, имеющим три взаимно ортогональные плоскости симметрии, две из нормалей к которым лежат в плоскости листа и направлены вдоль и перпендикулярно направлению проката (оси OX_1 и OX_2 ортогональной системы), третья нормаль направлена вдоль толщины листа (ось OX_3).

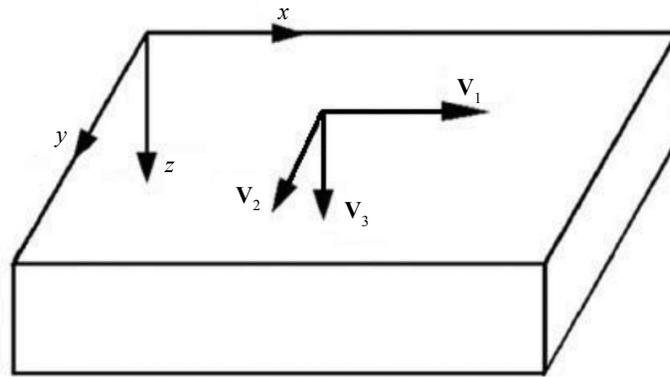


Рис. 2. Направления распространения волн в материале:
 V_1 — сдвиговая волна, параллельная поляризация; V_2 — сдвиговая волна, перпендикулярная поляризация;
 V_3 — продольная волна.

При исследовании распространения объемных упругих волн их волновые векторы были направлены вдоль толщины листа (их скорости V_i , где $i = 1, 2$ для горизонтально поляризованных поперечных волн, поляризованных вдоль осей X_1 и OX_2 соответственно, $i = 3$ — для продольной волны (рис. 2)).

Пренебрегая дисперсионными добавками, запишем выражение для скорости распространения объемных волн [20]:

$$V_i = V_i^{(0)}(1 - k^{(i)}H), \quad (7)$$

где $V_i^{(0)}$ — скорости упругих волн для материала в исходном состоянии; $k^{(i)}$ — экспериментально определяемые коэффициенты; $i = 1 \dots 3$ (в зависимости от типа упругой волны).

При разработке способов количественной оценки пористости, основанных на использовании объемных волн, мы будем применять эхо-импульсный метод с прямыми совмещенными преобразователями.

В качестве информативных измеряемых параметров, не зависящих от толщины материала в зоне измерений, целесообразно использовать отношение скорости продольной волны к скорости сдвиговой [20]. Тогда соответствующие отношения через время распространения упругих волн примут вид:

$$d_1 = \frac{V_3}{V_1} = \frac{t_{1,n}^{(1)}}{t_{1,n}^{(3)}}, \quad d_2 = \frac{V_3}{V_2} = \frac{t_{1,n}^{(2)}}{t_{1,n}^{(3)}}, \quad (8)$$

где V_1, V_2 — скорости распространения поперечных волн с продольной и поперечной поляризациями; V_3 — скорость продольной волны; $t_{1,n}^{(i)}$ — задержки n -х отраженных импульсов соответствующих типов волн относительно первых отраженных импульсов.

Через акустические параметры d_1, d_2 определяются такие важнейшие механические характеристики ортотропного материала, как коэффициенты Пуассона:

$$\nu_{31} = \frac{d_1^{(2)} - 2}{2(d_1^{(2)} - 1)}, \quad \nu_{32} = \frac{d_2^{(2)} - 2}{2(d_2^{(2)} - 1)}, \quad (9)$$

которые, как показано в ряде работ [22, 23], чувствительны к изменению структуры металлов при многих внешних термических и механических воздействиях на них.

Как следует из формул (7)—(11), связь параметров d_1, d_2 с содержанием водорода в материале можно записать в виде:

$$d_i = d_i^{(0)} \frac{1 - k^{(i)}H}{1 - k^{(3)}H}, \quad (10)$$

$d_i^{(0)}$ — значения соответствующих акустических параметров для материала в исходном состоянии; $i = 1, 2$.

В линейном приближении формулу (10) запишем следующим образом:

$$\delta d_i = \frac{d_i - d_i^{(0)}}{d_1^{(0)}} = k_d^{(i)} H, \quad (11)$$

где $k_d^{(i)} = k^{(i)} - k^{(3)}$.

Эксперименты показали, что для уменьшения случайной погрешности может быть использован также усредненный параметр $\langle d \rangle = \frac{d_1 + d_2}{2}$, для которого справедлива линеаризованная формула:

$$\delta \langle d \rangle = \frac{\langle d \rangle - \langle d^{(0)} \rangle}{\langle d^{(0)} \rangle} = \langle k_d \rangle H, \quad (12)$$

$$\text{где } \langle k_d \rangle = \frac{k_d^{(1)} d_1^{(0)} + k_d^{(2)} d_2^{(0)}}{2 \langle d^{(0)} \rangle}.$$

Из формул (11) следуют расчетные выражения для определения величины H :

$$H = \frac{\delta d_1}{k_d^{(1)}}, \quad (13)$$

$$H = \frac{\delta d_2}{k_d^{(2)}}, \quad (14)$$

$$H = \frac{\delta \langle d \rangle}{\langle k_d \rangle}. \quad (15)$$

Широко используемой характеристикой, не зависящей от толщины материала в зоне контроля, является параметр акустической анизотропии A .

Обычно этот параметр рассчитывается по формуле:

$$A_2 = 2 \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} = 2 \frac{t_{1,n}^{(2)} - t_{1,n}^{(1)}}{t_{1,n}^{(2)} + t_{1,n}^{(1)}} \quad (16)$$

или, как предложено в работе [22]:

$$A_3 = \frac{V_1^2 - V_2^2}{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2} = \frac{\frac{1}{(t_{1,n}^{(1)})^2} - \frac{1}{(t_{1,n}^{(2)})^2}}{\frac{1}{(t_{1,n}^{(1)})^2} + \frac{1}{(t_{1,n}^{(2)})^2} + \frac{1}{(t_{1,n}^{(3)})^2}}. \quad (17)$$

С учетом формул (7) следует ожидать линейной связи параметра A_2 с величиной H :

$$\Delta A_2 = A_2 - A_2^{(0)} = K_2^{(A)} H, \quad (18)$$

из которой следует формула для определения степени наводороживания:

$$H = \frac{\Delta A_2}{K_2^{(A)}}. \quad (19)$$

Из экспериментов видно наличие удовлетворительной линейной связи другой характеристики анизотропии A_3 с величиной H :

$$\Delta A_3 = A_3 - A_3^{(0)} = K_3^{(A)} H, \quad (20)$$

что приводит к формуле для оценки степени наводороживания через значение A_3 :

$$H = \frac{\Delta A_3}{K_3^{(A)}}. \quad (21)$$

В формулах (18)—(21) величины $A_2^{(0)}, A_3^{(0)}$ соответствуют ненаводороженному материалу, $K_2^{(A)}, K_3^{(A)}$ — постоянные.

Результаты экспериментов, описанных ниже, показали также наличие вполне достоверной регрессионной связи коэффициентов Пуассона, рассчитываемых по формуле (9), и их среднего значения $\langle v \rangle$ со степенью наводороживания:

$$\Delta v_{31} = v_{31} - v_{31}^{(0)} = k_{v_{31}} H; \quad (22)$$

$$\Delta v_{32} = v_{32} - v_{32}^{(0)} = k_{v_{32}} H; \quad (23)$$

$$\Delta \langle v \rangle = \langle v \rangle - \langle v \rangle^{(0)} = k_{\langle v \rangle} H, \quad (24)$$

которые соответствуют расчетным формулам для определения концентрации водорода через соответствующие коэффициенты Пуассона:

$$H = \frac{\Delta v_{31}}{k_{v_{31}}}; \quad (25)$$

$$H = \frac{\Delta v_{32}}{k_{v_{32}}}; \quad (26)$$

$$H = \frac{\Delta \langle v \rangle}{k_{\langle v \rangle}}. \quad (27)$$

В работе [20] получен ряд соотношений, описывающих эффекты, возникающие при распространении упругих импульсов в поврежденной среде, некоторые из которых могут быть использованы для построения способов количественной оценки параметра H . Воспользуемся аналогичными подходами.

Кроме достаточно очевидных параметров d_i и производных от них, не зависящих от толщины материала, легко получить еще одну временную характеристику, чувствительную к степени наводороживания и также не зависящую от толщины.

В [20] показано, что при распространении упругого импульса в поврежденной среде возникает линейно возрастающее с расстоянием смещение средней частоты несущей, причем скорость нарастания смещения пропорциональна характеристике рассеянной поврежденности, т.е. в нашем случае содержанию водорода H :

$$\omega_0(x) = \omega_0 - 8(k_1 + k_2 H)x\omega_0^3. \quad (28)$$

Подставив выражение (28) в соотношение (4), при $\omega = \omega_0$ получим формулу для скорости распространения фазы импульса, соответствующей центральной спектральной частоте:

$$V[(\omega_0(x))] = V_0[1 - k_3 H - k_4 H(\omega_0(x))^2 + 16k_1 k_4 H x (\omega_0(x))^4]. \quad (29)$$

Выражение (29) показывает, что скорость перемещения фазы импульса, соответствующей центральной частоте, увеличивается в процессе распространения импульса (своеобразное «ускорение» импульса), причем интенсивность этого увеличения пропорциональна степени наводороженности H .

Для многократно отраженных импульсов формула (29) приобретает вид:

$$\frac{2h}{t_{n,n+1}^{(i)}} = V_0 - AH - BH + 2nhCH, \quad (30)$$

где h — толщина материала; $A = k_3 V_0$; $B = k_4 V_0 \omega_0^2$; $C = 16k_1 k_4 V_0 \omega_0^4$; $i = 1, 2$.

Из (30), пренебрегая поправками второго порядка малости, легко получить соотношение между задержками $t_{1,2}^{(i)}$, $t_{n,n+1}^{(i)}$ и величиной H , не содержащее неизвестной толщины материала:

$$R_n^{(i)} = \frac{1}{t_{n,n+1}^{(i)}} - \frac{1}{t_{1,2}^{(i)}} = CH(n-1). \quad (31)$$

Уравнение (31) можно рассматривать как уравнение линейной регрессии без свободного члена функции $R_n^{(i)}$ по переменной $(n-1)$, при этом степень наводороживания определяет значение единственного коэффициента регрессии Q в уравнении регрессии:

$$R_n^{(i)} = Q(n-1). \quad (32)$$

Значение H находится на основании экспериментальной зависимости этого коэффициента от степени наводороживания $Q = f(H)$, которая, исходя из (31), должна быть прямо пропорциональной:

$$Q = CH. \quad (33)$$

Формула для определения величины H в данном случае имеет простой вид:

$$H = \frac{Q}{C}. \quad (34)$$

3.2. Оценка степени наводороживания с учетом сдвига амплитудного спектра

Из соотношения (28) следует, что уменьшение центральной спектральной частоты импульса f_0 по мере его распространения в наводороженном материале зависит от степени наводороживания H .

Из формулы (28) для многократно отраженных импульсов легко получить следующее выражение для характеристики смещения амплитудного спектра n -го отраженного импульса относительно первого:

$$\delta f_0(n) = \frac{f_0(1) - f_0(n)}{nhf_0^3} = D + GH, \quad (35)$$

где h — толщина материала в зоне измерений $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$; $D = 64\pi^2 k_1$; $G = 64\pi^2 k_2$.

Коэффициенты D и G определяются по результатам регрессионной обработки экспериментальных зависимостей $\delta f_0(n) = f(H)$, а для определения величины H может быть использована формула:

$$H = \frac{\delta f_0(n) - D}{G}. \quad (36)$$

Следует отметить, что в ряде экспериментальных работ отмечено влияние процессов деградации структуры материала на сдвиг амплитудного спектра распространяющихся в нем упругих импульсов, что подтверждает корректность выводов, сделанных на основе приведенного выше теоретического анализа.

3.3. Оценка степени наводороживания по спектрально-энергетическим параметрам структурного шума

Как отмечено выше, в качестве информативных параметров в задачах акустической структурометрии кроме традиционно используемых скорости распространения и коэффициента затухания упругих волн все большее внимание привлекают такие их характеристики, как параметры СШ.

В работах [15—17, 23—25] предложен метод ультразвуковой структуроскопии изделий из сложноструктурных материалов с помощью анализа спектральных характеристик СШ. Авторами показано, что комплексный радиотехнический анализ сигнала СШ дает возможность установить связь энергетического спектра с характером структурных неоднородностей исследуемого материала.

Сравнительный анализ экспериментальных данных показал, что при оценке параметров микроструктуры, микропор, микровключений, микротрещин и других микроповреждений, обеспечивающих рэлеевский характер рассеяния импульсов мегагерцового диапазона, к числу наиболее информативных характеристик следует отнести параметры энергетического спектра СШ.

СШ является случайным процессом, нестационарным по дисперсии, связанной с важнейшей характеристикой — энергетическим спектром. Это накладывает особенности на применение развитых к настоящему времени приемов обработки случайных процессов.

Существенно упрощает задачу оценки энергетического спектра СШ теоретически и экспериментально доказанная для типичных конструкционных материалов (в отличие от сложноструктурных) допустимость предположения о локально стационарном характере шума на участках оконного фурье-анализа [26].

Для получения необходимых количественных оценок энергетического спектра нами использовалось оконное преобразование сигнала $U(t)$ в виде [27]:

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} u_n w_n e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad (37)$$

где S_k — отсчеты спектральной плотности; N — количество эквидистантных отсчетов сигнала u_n на интервале его наблюдения; w_n — отсчеты оконной функции, в качестве которой используется окно Хэмминга [28, 29]:

$$w_n = \begin{cases} 0,53836 - 0,46164 \cos \frac{2\pi}{N}n, & n = 0, 1, \dots, N-1 \\ 0, & n \geq N \end{cases}, \quad (38)$$

имеющее наименьший уровень боковых лепестков — порядка -43 дБ.

Вследствие формирования СШ за счет множественного рассеяния на случайных неоднородностях его энергетическому спектру, полученному в результате обработки одной реализации, свойственен сильно изрезанный характер.

Чтобы получить сглаженный характер энергетического спектра, нужно его вычислить для большого числа реализаций, а затем произвести статистическое усреднение энергетического спектра. Этот метод математически корректен, так как в этом случае энергетический спектр СШ вычисляется в соответствии с правилами теории случайных процессов, однако для его осуществления требуется достаточно много (не менее нескольких десятков) независимых реализаций.

В данной работе нами использован прием статистического усреднения результатов измерений с целью сглаживания энергетических спектров, основанный на расчете энергетического спектра с помощью модифицированных периодограмм методом Уэлча [29], который обеспечивает состоятельную оценку величины P_k .

При разбиении массива значений СШ общей длительностью $N_{ш}$ на N_{seg} сегментов выражение для модифицированной периодограммы «структурный шум» примет вид:

$$P_k(i) = \frac{1}{U} \cdot \left| \sum_{n=0}^{N_n-1} u_n(i) w_n(i) e^{-j\frac{2\pi}{N_n}kn} \right|^2, \quad (39)$$

где N_n — длительность периодограммы; $i = 1, \dots, N_{seg}$; $\frac{1}{U}$ — весовой коэффициент, введенный Уэлчем:

$$U = \frac{\sum_{n=0}^{N_i-1} |w_n(i)|^2}{N_i}. \quad (40)$$

Общее число сегментов N_{seg} зависит от длительности шума $N_{ш}$, длительности периодограммы N_n и степени перекрытия сегментов t_s , %:

$$N_{\text{seg}} = \text{Int} \left[\frac{N_{\text{ш}} - N_{\text{п}}}{N_{\text{п}} \left(1 - \frac{t_s}{100} \right)} \right]. \quad (41)$$

Выражение для спектральной плотности мощности в соответствии с [29] имеет вид:

$$P_k = \frac{1}{N_{\text{seg}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{seg}}} \Pi_k(i). \quad (42)$$

Исследования проводились с использованием импульсов поверхностных волн с частотой 3 МГц по методике, аналогичной изложенной в работе [13].

Сказанное иллюстрируется ниже приведенными рисунками.

На рис. 3 приведена типичная осциллограмма, содержащая импульс поверхностной волны, прошедший через образец с повреждениями (образовавшиеся в структуре грубые выделения гидрида титана), и СШ для образца с содержанием водорода 0,161 мас. %.

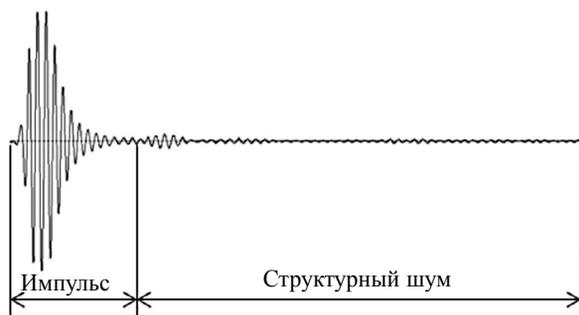


Рис. 3. Типичная осциллограмма для образца с содержанием водорода 0,161 мас. %.

На рис. 4 приведены соответствующие энергетические спектры. Для наглядности спектр СШ умножен на коэффициент 10^3 .

Рис. 4 показывает близость центральных спектральных частот сигнала и шумовой части осциллограммы что свидетельствует о том, что последняя связана именно с акустическим СШ.

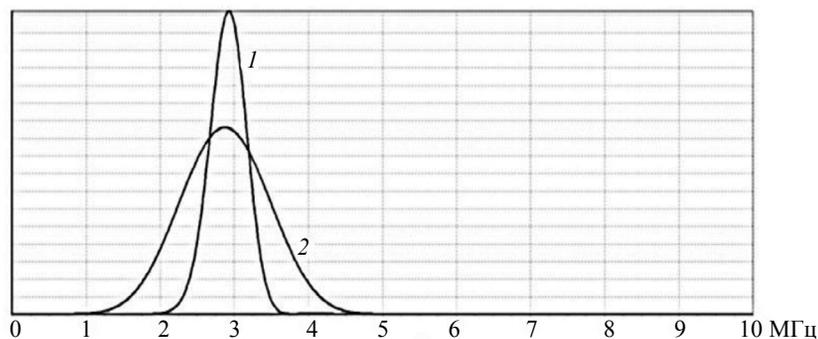


Рис. 4. Энергетические спектры импульса поверхностной волны (1) и СШ (2).

Из рис. 4 видно, что метод периодограмм эффективно сглаживает энергетический спектр СШ, что должно привести к заметному уменьшению случайных погрешностей при определении его энергетических характеристик.

В данной работе по аналогии с [12, 13] в качестве информативной количественной характеристики СШ будем использовать величину относительной энергии:

$$W = \frac{E_{\text{ш}}}{E_{\Sigma}}, \quad (43)$$

где $E_{\text{ш}}$ — энергия шума, которая рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{ш}} = \frac{1}{N_{\Pi}} \sum_{k=0}^{N_{\Pi}-1} P_k, \quad (44)$$

где P_k рассчитывается по формуле (40).

Полная энергия шума и сигнала E_{Σ} :

$$E_{\Sigma} = E_{\text{ш}} + E_c, \quad (45)$$

где E_c — энергия сигнала, рассчитываемая по формуле, аналогичной формуле (44):

$$E_c = \sum_{k=0}^{N_c-1} P_k, \quad (46)$$

где N_c — длительность сигнала.

Способ оценки концентрации водорода H может быть построена на базе экспериментальной зависимости:

$$W = f(H). \quad (47)$$

Как показали приведенные ниже экспериментальные результаты, зависимость (47) может быть линеаризована:

$$W = W_1 + W_2 H, \quad (48)$$

где W_1, W_2 — постоянные.

Из (48) следует расчетная формула для концентрации водорода:

$$H = \frac{W - W_1}{W_2}. \quad (49)$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 5 приведены типичные осциллограммы для поперечных и продольных волн соответственно.

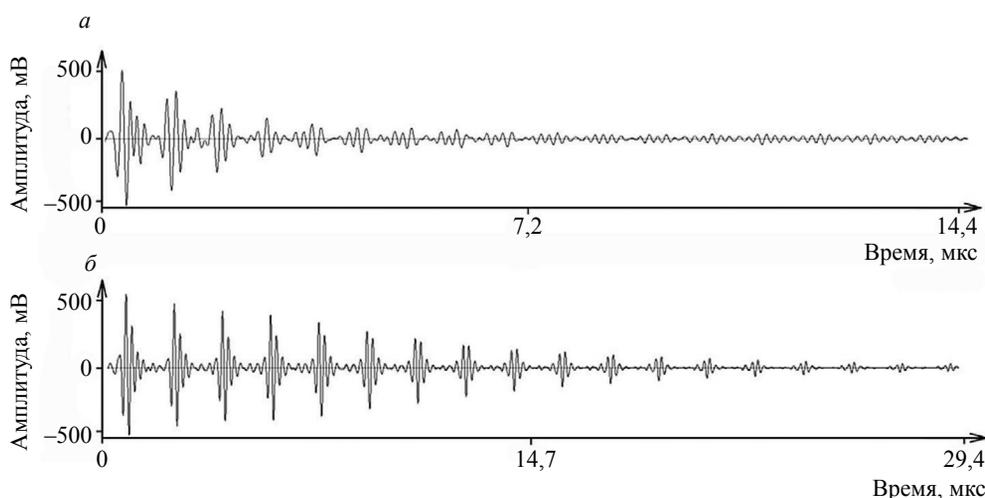


Рис. 5. Типичные осциллограммы отраженных импульсов продольных (а) и поперечных (б) волн.

Из рис. 5 видно, что для реализации измерительных алгоритмов оценки концентрации водорода, основанных на использовании выше описанных «тонких» параметров «ускорения» импульсов R_n^i и сдвига спектра $\delta f_0(n)$, целесообразнее использовать поперечные волны, имеющие значительно меньший коэффициент затухания. Это обеспечивает большее количество упругих импульсов, прошедших через образец.

Продольные волны (совместно с поперечными) использовались для измерения традиционных характеристик, связанных с отношениями скоростей распространения волн различного типа.

4.1. Влияние наводороживания на временные параметры упругих импульсов

На рис. 6а приведены графики, иллюстрирующие влияния концентрации водорода на временные параметры Δd_1 , Δd_2 , Δd_1 , $\Delta \langle d \rangle$, на рис. 6б — аналогичные графики для параметров ΔA_2 , ΔA_3 , а на рис. 6в — для параметров Δv_{31} , Δv_{32} , $\Delta \langle v \rangle$.

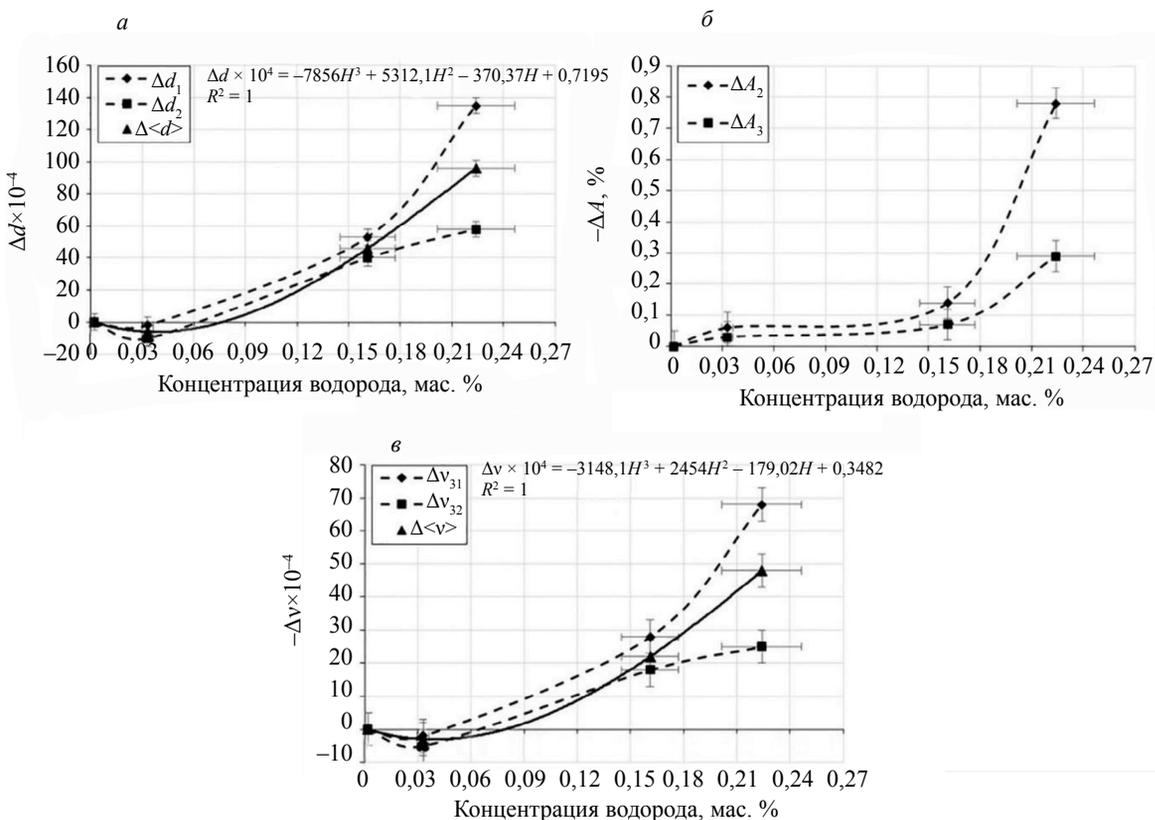


Рис. 6. Влияния концентрации водорода на временные параметры d_1 , d_2 , $\langle d \rangle$ (а), ΔA_2 , ΔA_3 (б) и на коэффициенты Пуассона ν_{31} , ν_{32} , $\langle \nu \rangle$ (в).

Ниже описаны результаты экспериментальной проверки влияния степени наводороженности на теоретически описанный выше эффект «ускорения» импульса с целью оценки возможности построения соответствующего расчетного способа.

На рис. 7 приведены графики зависимости параметра «ускорения» импульса поперечных волн R_n^i (формула (39)) от номера отраженного импульса для различных значений концентрации водорода.

Рис. 7 показывает, что зависимости $R_n(n-1)$ близки к прямо пропорциональным с коэффициентом детерминации не менее 0,9 (кроме случая минимальной концентрации водорода, для которого зависимость не выявляется, что позволяет считать соответствующий коэффициент детерминации равным 0).

На рис. 8 приведена зависимость коэффициентов регрессии Q для разных прямых на рис. 7 от концентрации H .

Достоверность аппроксимации прямо пропорциональной зависимости $Q(H)$ равна 0,92, что подтверждает справедливость формулы (33), для которой коэффициент $Q \approx 7,8 \times 10^{-7} \text{нс}^{-1}$.



Рис. 7. Зависимость параметра «ускорения» R_n от номера отраженного импульса.

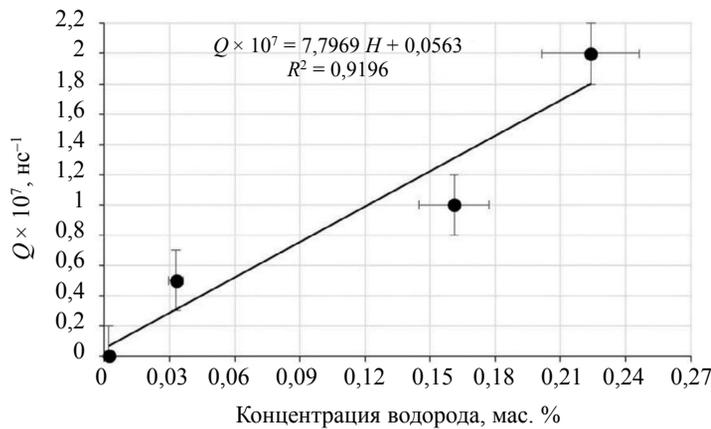


Рис. 8. Влияние концентрации водорода на коэффициент регрессии Q .

4.2. Влияние наводороживания на параметры сдвига амплитудного спектра

На рис. 9 приведены графики амплитудных спектров для 1-го и 15-го отраженных импульсов поперечных волн при различных концентрациях водорода ($C_{[H]}$).

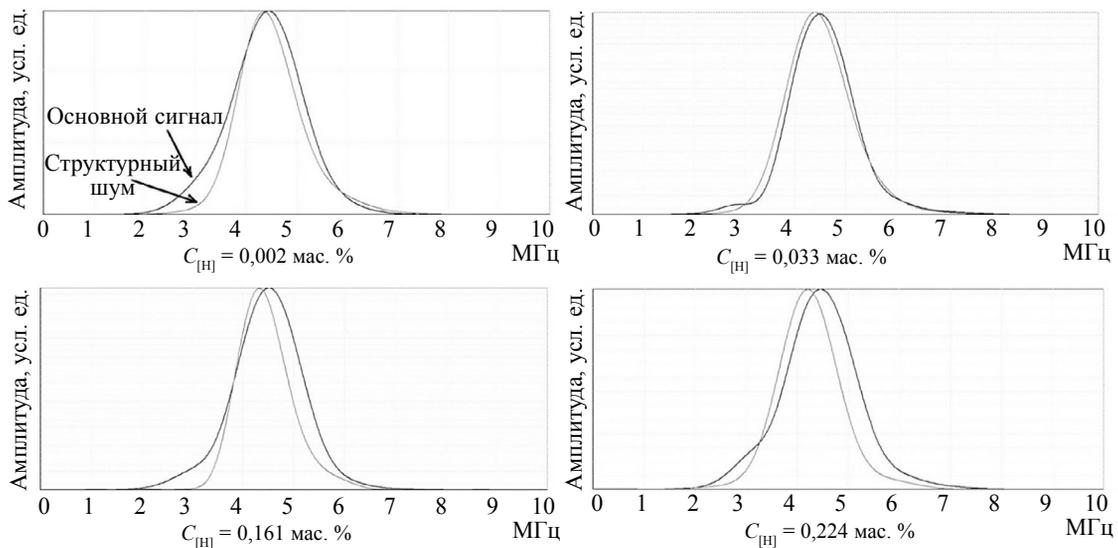
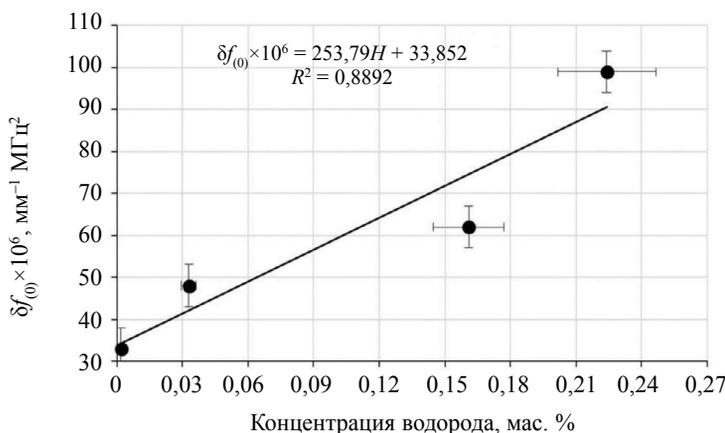


Рис. 9. Смещение амплитудного спектра 15-го отраженного импульса относительно 1-го для различных концентраций водорода в сплаве ВТ1-0.

Рис. 10. Влияния концентрации водорода на параметр смещения спектра $\delta f_0(n)$.

На рис. 10 приведен график зависимости параметра $\delta f_0(n) = \frac{f_0(1) - f_0(n)}{nhf_0^3}$ (формула (35)) от концентрации водорода.

Коэффициенты регрессии в формуле (39): $D = 33,8 \times 10^{-6} \text{ (мм)}^{-1} \text{ (МГц)}^{-2}$, $G = 253,8 \times 10^{-6} \text{ (мм)}^{-1} \text{ (МГц)}^{-2}$. Коэффициент детерминации составил 0,89.

4.3. Влияние наводороживания на спектрально-энергетические параметры структурного шума

При экспериментальном исследовании влияния степени наводороживания на относительную энергию СШ W , последнюю рассчитывали с использованием программного обеспечения ИВК «АСТРОН», содержащего блок БПФ с числом точек 2^{13} .

На рис. 11 приведен график зависимости параметра W от степени наводороживания.

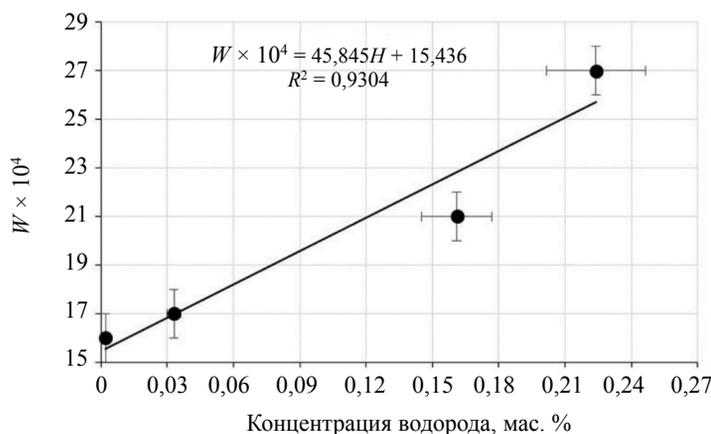


Рис. 11. Влияния концентрации водорода в сплаве ВТ1-0 на относительную энергию СШ.

Зависимость $W(H)$ с коэффициентом детерминации 0,93 аппроксимируется линейной зависимостью с коэффициентами $W_1 \approx 15,4 \times 10^{-4}$, $W_2 \approx 45,8 \times 10^{-4}$.

На графиках зависимостей изменения значений акустических параметров Δd и ν от концентрации водорода (рис. 6a) в точке, соответствующей $C_{[H]} = 0,033 \text{ мас. \%}$, наблюдается провал. Это, по-видимому, объясняется сменой физического механизма влияния наводороживания на структуру титанового сплава ВТ1-0 и его упругие характеристики. Полученные физические свойства сплава ВТ1-0 (без признаков наводороживания, $C_{[H]} = 0,002 \text{ мас. \%}$) и гидроксида титана приведены в табл. 2.

Физические свойства исследуемого сплава ВТ1-0 и гидрида титана

Материал	Плотность ρ , г/см ³	E , ГПа	G , ГПа	ν
ВТ1-0 ($C_{[H]} = 0,002$ мас. %)	4,492	121,0	45,8	0,322
TiH _(1,5-2) ($C_{[H]} = 3,5 - 4,04$ мас. %)	3,794	168,2	71,9	0,170

На рис. 12 приведены микроструктуры сплава ВТ1-0 с различным содержанием водорода. При повышении содержания водорода в сплаве наблюдается образование гидридной фазы TiH_x, расположенной в теле зерна и по границам зерен. При небольших насыщениях до концентраций водорода (~ 0,01 мас. %) атомы водорода занимают октаэдрические пустоты в кристаллической решетке титана, при этом присутствие незначительного количества гидридов не оказывает существенного влияния на упругие свойства материала. При дальнейшем увеличении концентрации водорода в сплаве происходит формирование грубых гидридных выделений на границе зерен. Размеры таких включений возрастают с ростом концентрации водорода, а при больших концентрациях ($C_{[H]} = 0,224$ мас. % на рис. 12) гидриды, объединяясь, формируют граничную сетку трещин. Таким образом, структурная деградация в α -титановых сплавах в присутствии водорода оказывает существенное влияние на весь комплекс физико-механических свойств материала, включая упругие, непосредственно контролируемые при реализации акустических методов.

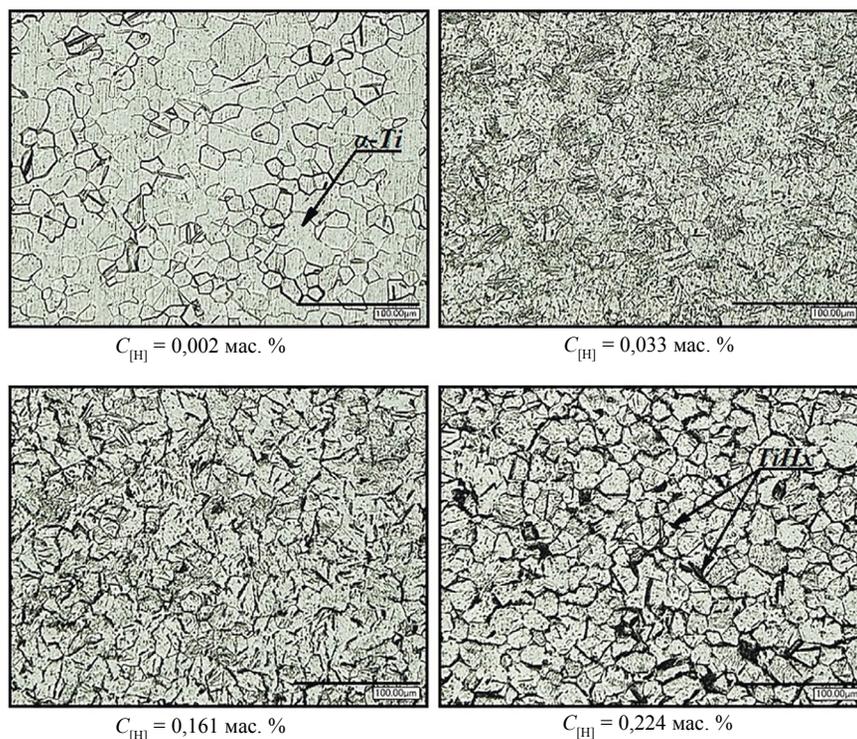


Рис. 12. Микроструктуры сплава ВТ1-0 с различным содержанием водорода.

Использование большинства предложенных акустических способов обеспечивает приемлемую погрешность при определении концентрации водорода в титановом сплаве ВТ1-0. При этом наименьшую точность при малых содержаниях водорода в сплаве имеют параметры Δd_2 и Δv_{32} .

ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение содержания водорода (до 0,224 мас. %) в сплаве ВТ1-0 приводит к разуплотнению (снижение плотности на 1,7 %) и изменению структуры сплава (образованию и росту объемной доли хрупкой составляющей — гидрида титана).

2. Структурные изменения при наводороживании сплава ВТ1-0 оказывают существенное влияние на параметры как сигнала (увеличение временных параметров Δd , ΔA и коэффициента Пуассона $\Delta \nu$), так и структурного шума (увеличение относительной энергии СШ W , параметра смещения спектра $\delta f_0(n)$, коэффициента регрессии Q , параметра «ускорения» импульса поперечных волн R_n^i).

3. Разработанный способ акустической оценки наводороженного состояния показал, что увеличение содержания водорода до 0,224 мас. % приводит к изменению значений названных выше акустических коэффициентов до 1 %. Это значительно превышает погрешность измерения и, соответственно, может быть использовано в задачах неразрушающего контроля оценки степени наводороживания титановых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khlybov A.A., Ryabov D.A., Shishulin D.N., Pichkov S.N.* Physical Acoustics Methods for Assessing Hydrogen Embrittlement in PT-7M Grade Titanium Alloy // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2023. V. 14. No. 1. P. 164—171. DOI: 10.1134/S2075113323010173

2. *Щур Д.В., Загинайченко С.Ю., Везироглу А., Везироглу Т.Н., Золотаренко А.Д., Габдуллин М.Т., Рамазанов Т.С., Золотаренко А.Д., Золотаренко А.Д.* Особенности изучения систем атомарный водород—металлы // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2019. № 13—15. С. 62—87.

3. *Laadel Nour-Eddine, Mansori Mohamed El, Kang Nan, Marlin Samuel, Boussant-Roux Yves.* Permeation barriers for hydrogen embrittlement prevention in metals — A review on mechanisms, materials suitability and efficiency // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. V. 47. Is. 76. P. 32707—32731.

4. *Верховский А.Е., Гаджиев К.Г., Уртенев Д.С., Гаджиев Д.К.* Влияние наводороживания и температуры на служебные характеристики титанового сплава // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. № 1 (103). С. 57—60.

5. *Кантюков Р.Р., Запелалов Д.Н., Ваганов Р.К.* Исследование влияния водорода на стали в сероводородсодержащих и других средах на газовых объектах // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2024. № 67 (1). С. 53—64. DOI: 10.17073/0368-0797-2024-1-53-64

6. *Чернов Ю.П., Черданцев Ю.П., Мамонтов А.П., Панин А.В., Никитенков Н.Н., Лидер А.М., Гаранин Г.В.* Неразрушающие методы контроля водородного охрупчивания конструкционных материалов // *Альтернативная энергетика и экология*. 2009. № 2. С. 15—22.

7. *Лидер А.М., Ларионов В.В., Гаранин Г.В., Кренинг М.Х.* Метод ультразвукового определения водорода в материалах и изделиях на основе титана // *Журнал технической физики*. 2013. Т. 83. Вып. 9. С. 157—158.

8. *Полянский В.А., Беляев А.К., Полянский А.М., Третьяков Д.А., Яковлев Ю.А.* Водородная хрупкость как результат поверхностных явлений при деформации металлов // *Физическая мезомеханика*. 2022. Т. 25 (3). С. 27—37.

9. *Gomes P.M., Domizzi G., Lopez Pumagera M.I., Ruzzante J.E.* Characterization of hydrogen concentration in Zircaloy-4 using ultrasonic techniques // *Journal of Nuclear Materials*. 2006. V. 353. P. 167—176.

10. *Chunjie Ye., Wenbin Kan, Yongfeng Li, Hongliang Pan.* Experimental study of hydrogen embrittlement on AISI 304 stainless steels and Rayleigh wave characterization // *Engineering Failure Analysis*. 2013. V. 34. P. 228—234.

11. *Yebo Lu, Wenbin Kan, Hongliang Pan.* Effect of hydrogen concentration on the ultrasonic propagation properties in 304 stainless steel / *International Conference on Fracture. ICF12. Ottawa*. 2009.

12. *Khlybov A.A., Uglov A.L., Bakiev T.A., Ryabov D.A.* Assessment of the degree of damage in structural materials using the parameters of structural acoustic noise // *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2022. V. 38 (2). P. 331—350. DOI: 10.1080/10589759.2022.2126470

13. *Хлыбов А.А., Углов А.Л.* Об использовании параметров структурного шума при контроле поверхностными акустическими волнами Рэлея стали 20ГЛ в процессе упругопластического деформирования // *Дефектоскопия*. 2021. № 7. С. 3—10.

14. *Качанов В.К., Соколов И.В., Первушин В.В., Тимофеев Д.В.* Структуроскопия изделий из полимерных материалов с помощью анализа мгновенного спектра ультразвуковых сигналов // *Дефектоскопия*. 2019. № 6. С. 3—10.

15. *Романишин Р.И., Романишин И.М.* Оценка рассеянной поврежденности конструкционных материалов // *Дефектоскопия*. 2019. № 2. С. 25—35.

16. *Карташев В.Г., Качанов В.К., Соколов И.В., Воронкова Л.В., Концов Р.В.* Структурный шум при ультразвуковом контроле изделий из материалов со сложной структурой // *Дефектоскопия*. 2018. № 1. С. 19—32.

17. *Романишин Р.И., Романишин И.М.* Обработка обратно рассеянного сигнала в ультразвуковом контроле // *Дефектоскопия*. 2018. № 6. С. 11—16.

18. *Hirse Korn S., Van Andel P.W., Netzelmann U.* Ultrasonic Methods to Detect and Evaluate Damage in Steel // *NDT & E*. 1998. 15:6. P. 373—393.

19. *Han Y.K., Thompson R.B.* Ultrasonic backscattering in duplex microstructures: Theory and application to titanium alloys // *Metall. Mater. Trans.* 1997. A28. P. 91—104.

20. Хлыбов А.А., Углов А.Л., Демченко А.А. О спектрально-акустическом способе оценки пористости металлов, полученных методом горячего изостатического прессования // Дефектоскопия. 2022. № 12. С. 3—16.
21. Сараев Л.А. К теории упругости микронеоднородных сред, учитывающей стохастические изменения связности составляющих компонентов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2021. № 2. С. 132—143. DOI: 10.15593/pern.mech/2021.2.12
22. Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Kachanov M. On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy // International Journal of Engineering Science. 2021. V. 168. P. 103567.
23. Kachanov M., Mishakin V.V., Pronina Yu. 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 // International Journal of Engineering Science. 2021. V. 169. P. 103569.
24. Муравьев В.В., Байтерьяков А.В. Влияние эксплуатационной грузонапряженности рельсов на акустические структурные шумы // Дефектоскопия. 2016. № 11. С. 50—58.
25. Муравьев В.В., Котоломов А.Ю., Байтерьяков А.В., Дедов А.И. Определение размера зерна металла по акустическим структурным шумам // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2014. V. 57 (11). С. 65—69. DOI:10.17073/0368-0797-2014-11-65-69.
26. Сергиенко Б.А. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2006. 751 с.
27. Хэмминг Р.В. Цифровые фильтры. М.: Недра, 1987. 221 с.
28. Hayes M. H. Statistical digital signal processing and modeling. John Wiley & Sons, 2009. 624 p.
29. Welch P. The use of the fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Trans. Audio Electroacoust. 1967. V. 15. P. 70—73.

REFERENCES

1. Khlybov A.A., Ryabov D.A., Shishulin D.N., Pichkov S.N. Physical Acoustics Methods for Assessing Hydrogen Embrittlement in PT-7M Grade Titanium Alloy // Inorganic Materials: Applied Research. 2023. V. 14. No. 1. P. 164—171. DOI: 10.1134/S2075113323010173
2. Schur D.V., Zaginaichenko S.Yu., Veziroglu A., Veziroglu T.N., Zolotareno A.D., Gabdullin M.T., Ramazanov T.S., Zolotareno A.D., Zolotareno A.D. Features of Studying Atomic Hydrogen — Metal Systems. Alternative Energy and Ecology (ISJAEE). 2019. V. 13—15. P. 62—87. (In Russ.) DOI:10.15518/isjaee.2019.13-15.62-87
3. Laadel Nour-Eddine, Mansori Mohamed El, Kang Nan, Marlin Samuel, Boussant-Roux Yves. Permeation barriers for hydrogen embrittlement prevention in metals — A review on mechanisms, materials suitability and efficiency // International Journal of Hydrogen Energy. 2022. V. 47. Is. 76. P. 32707—32731.
4. Verkhovsky A.E., Gadzhiev K.G., Urtenov D.S., Gadzhiev D.K. Influence of Hydrogenation and Temperature on the Service Characteristics of Titanium Alloy // International Research Journal. Jan. 2021. No. 1 (103). DOI: 10.23670/IRJ.2021.103.1.007
5. Kantjukov R.R., Zapevalov D.N., Vagapov R.K. Effect of hydrogen on steels in hydrogen sulfide-containing and other environments at gas facilities // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2024. V. 67 (1). P. 53—64. DOI: 10.17073/0368-0797-2024-1-53-64
6. Chernov I.P., Cherdantsev Yu.P., Mamontov A.P., Panin A.V., Nikitenkov N.N., Leader A.M., Garanin G.V. Non-destructive methods of control of hydrogen embrittlement of structural materials // Alternative energy and ecology. 2009. No. 2. P. 15—22.
7. Leader A.M., Larionov V.V., Garanin G.V., Krening M.H. Method of ultrasonic determination of hydrogen in titanium-based materials and products // Journal of Technical Physics. 2013. V. 83. Is. 9. P. 157—158.
8. Polyansky V.A., Belyaev A.K., Polyansky A.M., Tretyakov D.A., Yakovlev Yu.A. Hydrogen brittleness as a result of surface phenomena during deformation of metals // Physical Mesomechanics. 2022. V. 25 (3). P. 27—37.
9. Gomes P.M., Domizzi G, Lopez Pumagera M.I., Ruzzante J.E. Characterization of hydrogen concentration in Zircaloy-4 using ultrasonic techniques // Journal of Nuclear Materials. 2006. V. 353. P. 167—176.
10. Chunjie Ye., Wenbin Kan, Yongfeng Li, Hongliang Pan. Experimental study of hydrogen embrittlement on AISI 304 stainless steels and Rayleigh wave characterization // Engineering Failure Analysis. 2013. V. 34. P. 228—234.
11. Yebo Lu, Wenbin Kan, Hongliang Pan. Effect of hydrogen concentration on the ultrasonic propagation properties in 304 stainless steel / International Conference on Fracture. ICF12. Ottawa. 2009.
12. Khlybov A.A., Uglov A.L., Bakiev T.A., Ryabov D.A. Assessment of the degree of damage in structural materials using the parameters of structural acoustic noise // Nondestructive Testing and Evaluation. 2022. V. 38 (2). P. 331—350. DOI: 10.1080/10589759.2022.2126470
13. Khlybov A.A., Uglov A.L. On the use of structural noise parameters in testing 20GL steel with rayleigh surface waves under elastoplastic deformation // Defektoskopiya. 2021. No. 7. P. 3—10. DOI: 10.31857/S0130308221070010

14. *Kachanov V.K., Sokolov I.V., Timofeev D.V., Pervushin V.V.* Structure analysis of products made of polymer materials using instantaneous spectra of ultrasonic signals // *Defektoskopiya*. 2019. No. 6. P. 3—10. DOI: 10.1134/S0130308219060010
15. *Romanishin R.I., Romanishin I.M.* Assessment of scattered damage in structural materials // *Defektoskopiya*. 2019. No. 2. P. 25—35. DOI: 10.1134/S0130308219020039
16. *Kartashev V.G., Kachanov V.K., Sokolov I.V., Voronkova L.V., Konts R.V.* Structural noise during ultrasonic inspection of products made of materials with a complex structure // *Defektoskopiya*. 2018. No. 1. P. 19—32.
17. *Romanishin R.I., Romanishin I.M.* Processing of backscattered signal in ultrasonic testing // *Defektoskopiya*. 2018. No. 6. P. 11—16. DOI: 10.1134/S1061830918060074
18. *Hirse Korn S., Van Andel P.W., Netzelmann U.* Ultrasonic Methods to Detect and Evaluate Damage in Steel // *NDT & E*. 1998. 15:6. P. 373—393.
19. *Han Y.K., Thompson R.B.* Ultrasonic backscattering in duplex microstructures: Theory and application to titanium alloys // *Metall. Trans.* 1997. A28. P. 91—104.
20. *Khlybov A.A., Uglov A.L., Demchenko A.A.* On the spectral-acoustic method for estimating the porosity of metals obtained by hot isostatic pressing // *Defektoskopiya*. 2022. No. 12. P. 3—16.
21. *Saraev L.A.* On the theory of elasticity of micro-inhomogeneous media with account for stochastic changes in the connectivity of constituent components // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2021. No. 2. P. 132—143. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.12
22. *Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kurashkin K.V., Klyushnikov V.A., Kachanov M.* On low-cycle fatigue of austenitic steel. Part I: Changes of Poisson's ratio and elastic anisotropy // *International Journal of Engineering Science*. 2021. V. 168. P. 103567.
23. *Kachanov M., Mishakin V.V., Pronina Yu.* 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 // *International Journal of Engineering Science*. 2021. V. 169. P. 103569.
24. *Muravyov V.V., Bayteryakov A.V.* Influence of operational load-bearing of rails on acoustic structural noises // *Defektoskopiya*. 2016. No. 11. P. 50—58. DOI: 10.31857/S0130308221070010
25. *Murav'ev V.V., Kotolomov A.Yu., Baiteryakov A.V., Dedov A.I.* The methodology of determining the grain size by acoustic structural noise of steel // *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014. V. 57 (11). P. 65—69. (In Russ.). DOI:10.17073/0368-0797-2014-11-65-69
26. *Sergienko B.A.* Tsifrovaya obrabotka signalov (Digital signal processing). St. Petersburg: Peter, 2006. 751 p.
27. *Hamming R.V.* Tsifrovyye fil'try (Digital filters). Moscow: Nedra, 1987. 221 p.
28. *Hayes M. H.* Statistical digital signal processing and modeling. John Wiley & Sons, 2009. 624 p.
29. *Welch P.* The use of the fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* 1967. V. 15. P. 70—73.

СЛОИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ГИДРИРОВАННЫЕ ПЛЕНКИ ИЗ ЦИРКОНИЯ И НИОБИЯ: СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ И КОНТРОЛЬ МЕТОДОМ ТЕРМОЭДС (ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД)

© 2024 г. В.В. Ларионов^{1,*}, Р.С. Лаптев^{1,**}, А.М. Лидер^{1,***}

¹Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: *lvv@tpu.ru; **laptevrs@tpu.ru; ***lider@tpu.ru

Поступила в редакцию 15.05.2024; после доработки 07.06.2024
Принята к публикации 05.07.2024

Для получения слоистых материалов с включением водорода использованы пленки Nb/Zr с различным количеством слоев от 50 до 100. Пленки напыляли на подложку из кремния вакуумно-магнетронным способом на специализированной установке. Толщину пленок варьировали от 10 до 50 нм. Полученный материал гидрировали протонами на электростатическом генераторе ТПУ с энергией до 1,2 МэВ. Определены режимы нанесения наноразмерных металлических многослойных систем Zr/Nb: для Zr-мишени удельная мощность распылительной системы равна 37,9 Вт/см², для Nb-мишени — 26,4 Вт/см². Получено покрытие с четкими границами между индивидуальными слоями циркония и ниобия. Показано, что оптимальными режимами для исследования наноразмерных слоев Zr/Nb является давление 700 Па, мощность 40 Вт, частота 2 кГц, коэффициент заполнения плазмы 12,5 % для покрытий с толщиной индивидуальных слоев 100 нм. Для покрытий с толщиной слоев от 10 до 50 нм — давление 650 Па, мощность 40 Вт, частота 1 кГц. Для контроля свойств применяется метод термоэдс (термоэлектрический метод) (ГОСТ 25315—82). Выявлено, что после протонного облучения происходит интенсивное накопление атомов водорода вблизи интерфейсов, снижает дефектность структуры и влечет изменение термоэдс вплоть до инверсии ее знака. Распределение водорода имеет преимущественно бимодальный характер, локальные максимумы концентрации водорода наблюдаются на границах раздела Nb/Zr, а на границе раздела Zr/Nb накопление значительно ниже. Локализация водорода вблизи интерфейсов происходит преимущественно в окрестности циркония.

Ключевые слова: пленки, гидрирование протонами, цирконий, никель, контроль, термоэдс.

LAERED COMPOSITE HYDROGENATED FILMS OF ZIRCONIUM AND NIOBIUM: METHOD OF PRODUCTION AND CONTROL OF PROPERTIES BY THERMOPOWER METHOD

© 2024 V.V. Larionov^{1,*}, R.S. Laptev^{1,**}, A.M. Lider^{1,***}

¹Institute of Physics and Technology, National Research Tomsk Polytechnic University,
Russia 634050 Tomsk, Lenin Avenue, 30
E-mail: *lvv@tpu.ru; **laptevrs@tpu.ru; ***lider@tpu.ru

In this work, to obtain layered materials with the inclusion of hydrogen, Nb/Zr films with different numbers of layers from 50 to 100 were used. The films were sputtered onto a silicon substrate using the vacuum-magnetron method in a specialized installation. The film thickness was varied from 10 to 50 nm. The resulting material was hydrogenated with protons on a TPU electrostatic generator with an energy of up to 1,2 MeV. The optimal modes for deposition of nano-sized metal multilayer Zr/Nb systems have been determined: for a Zr target, the specific power of the sputtering system is 37,9 W/cm², for a Nb target — 26,4 W/cm². A coating with clear boundaries between the individual layers of zirconium and niobium was obtained. It is shown that the optimal modes for studying nano-sized Zr/Nb layers are pressure 700 Pa, power 40 W, frequency 2 kHz, plasma fill factor 12,5 % for coatings with a thickness of individual layers of 100 nm. For coatings with individual layer thicknesses from 10 to 50 nm, the optimal pressure is 650 Pa, power 40 W, frequency 1 kHz. To control properties, the thermopower method is used. It was revealed that after proton irradiation there is an intensive accumulation of hydrogen atoms near the interfaces, which entails a change in the thermopower up to an inversion of its sign. The hydrogen distribution is predominantly bimodal, with local maxima in hydrogen concentration observed at the Nb/Zr interface, and the accumulation at the Zr/Nb interface is significantly lower. Hydrogen localization near the interfaces occurs predominantly in the vicinity of zirconium.

Keywords: films, proton hydrogenation, zirconium, nickel, control, thermopower.

DOI: 10.31857/S0130308224080021

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальным становится получение энергии из солнечных панелей, встроенных в различные конструкции, датчиков нагрузки, чтобы отслеживать состояние конструкционных материалов, разработка электроники, встроенной в одежду человека, отслеживающей его здоровье. Разработаны антенны, способные поглощать из окружающего пространства сигналы Wi-Fi, Bluetooth и сотовых телефонов и превращать их в пригодную для использования электроэнергию. Предполагается, что ключом к этим технологиям служит слоистая среда, уложенная плоским слоем толщиной всего в несколько атомов. Ими можно красить промышлен-

ные объекты, делать датчики, следящие за нагрузкой и трещинами. Их можно накладывать на окна прозрачным слоем, который становится видимым только при показе информации. Устройства для поглощения радиоволн смогут питать электронику.

Многослойные композиционные пленки обеспечивают изменение локальных свойств материалов [1—7]. Одними из наиболее разработанных способов создания являются методы аддитивного производства и физического осаждения, которые позволяют создавать функционально-градиентные 3D- и 2D-материалы (ФГМ) соответственно [1]. Вопросы повышения физико-механических свойств объемных изделий аддитивного производства, в том числе и водородной стойкости, обсуждаются во многих работах [8—16]. Известны исследования наноразмерных металлических многослойных систем, полученных методами физического осаждения, обладающим свойствами самовосстановления, в том числе на основе системы Zr/Nb [17—23]. В данных работах частично обозначена проблема дефектной структуры низкой размерности (вакансии и их комплексы, дислокации и др.). Заметим, что напыление циркония и ниобия в виде пленки обычно производят с целью повышения коррозионных свойств материалов для подавления вредного влияния коррозирующих примесей и улучшение коррозионных свойств самого циркония, например в реакторных установках [28—31].

Перспективными методами анализа структуры функционально-градиентных материалов при облучении и накоплении водорода, позволяющие исследовать динамику термоэлектрических свойств в широком диапазоне концентраций, является метод термоэдс (термоэлектрический метод, ГОСТ 25315—82), широко примененный для изучения графена и подобных материалов [24—27]. Ключевым моментом является применение данного метода исследования слоистой среды, в которую внедрен водород. Наиболее простым является случай, когда вклад проводимости осуществляется в однородной среде носителями одного типа. Между тем, в данном случае в проводимости могут участвовать носители тока, принадлежащие нескольким зонам (например, электроны и дырки в переходных металлах) или несколько групп носителей тока, принадлежащих одной зоне, но соответствующие различным областям сильно анизотропной поверхности Ферми.

Факторы, влияющие на накопление водорода (гидрирование), проанализированы во многих работах [31—34]. В процессе изготовления слоев (после радиационного воздействия и напыления) требуется оперативный анализ и контроль взаимодействия водорода со структурой слоистой среды. В указанных целях нами предложено измерять величину термоэдс [35, 36]. Наблюдение за изменением термоэдс в ходе изменения свойств слоев при насыщении водородом имеет определенные преимущества. Термоэдс реагирует на возмущения решетки вблизи дефекта не только величиной, но и знаком эффекта. При этом может быть получена информация не только о роли дефектов, но и о механизме их образования.

Целью работы является получение, анализ и контроль дефектности наноразмерных гидрированных многослойных систем Zr/Nb методами термоэдс, энергодисперсионной спектроскопии и оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Нанесение слоев Zr/Nb проводилось на установке «Радуга спектр» (Томский политехнический университет). В качестве подложки использован образец кремния размером 0,5 мм толщиной и 20×20 мм. Образцы предварительно полировали наждачной бумагой до шероховатости 0,1 мкм. Использован вакуумный дуговой испаритель с коаксиальным плазменным фильтром. Камеру предварительно вакуумировали до давления $2,5 \cdot 10^{-3}$ Па. Перед осаждением образцы были подвергнуты ионной бомбардировке в аргоновой плазме тлеющего разряда при 1500 В в течение 5 мин. Измерение толщины пленки проводилось на приборе Calotest CAT-S-0000 методом шарового истирания при помощи стального шара известного радиуса. Образцы фиксировались в специальном держателе, расположенном в вакуумной камере, предельное остаточное давление в камере составляло $2,5 \cdot 10^{-3}$ Па. Для удаления различных типов загрязнений и оксидной пленки, сформированной на поверхности материала, использовалась ионная очистка. Очистка поверхности исследуемых образцов осуществлялась ионами аргона с использованием низкоэнергетичного ионного источника до осаждения покрытия. После облучения на ускорителе ионами водорода концентрация водорода в образцах измерялась при помощи анализатора водорода RHEN602 фирмы LECO. Анализ материала осуществлен на энергодисперсионном спектрометре (ЭДС) компании JEOL Ltd (Япония). Гидрирование осуществляли протонами с энергией до 1,75 МэВ и током пучка до 33 мкА на протонном ускорителе с флюенсом от $3,4 \cdot 10^{15}$ до $3,4 \cdot 10^{16}$ ион/см². Анализ глубины имплантации протонов проводился в программном пакете SRIM-2013. Моделирование было выполнено для многослойных систем Zr/Nb с толщиной индивидуальных слоев 25 и 100 нм и общей толщи-

ной ~ 1 мкм. При данной энергии протоны эффективно останавливаются преимущественно в слоистой среде, и лишь небольшое их число достигает кремниевой подложки. Исследование распределения химических элементов в слоях Zr/Nb после наводороживания осуществлялись методом оптической эмиссионной спектроскопии высокочастотного тлеющего разряда (ОЭСТР) на спектрометре GD-Profilер 2 (Франция), оснащенным высокочастотным импульсным генератором переменным током. Распределение химических элементов по глубине исследовалось в импульсном режиме при мощности 40 Вт, давлении 650 Па, частоте 1 кГц, коэффициенте заполнения 25 %. Распыление проводилось на аноде диаметром 4 мм, рабочим газом является аргон. Термоэдс измеряли зондом из золота дифференциальным методом относительно эталонного образца из меди. Это обеспечивало высокую чувствительность и минимальные погрешности. Соединение исследуемого и эталонного образцов осуществлялось с помощью массивного медного блока, который подвергался регулируемому нагреву. Измерения для каждого образца проводились по 5 раз с поворотом его на 180 град для усреднения возможных неоднородностей структуры по площади. Площадь зонда составляла 1 мм². Погрешность измерений термоэдс из-за температурных нестабильностей не превышала 5 % [20].

Значения термоэдс теоретически обоснованы в работах [37—39], где получена формула:

$$E_s = \frac{k_B}{e} \xi k_B (T_0 T)^{1/2} \frac{\partial(\ln g(E_F))}{\partial E}, \quad (1)$$

где $g(E_F)$ — плотность состояний на уровне Ферми; $\xi = 0,1$ — численный коэффициент; k_B — постоянная Больцмана; e — заряд электрона; T — температура. Известна также зависимость $E(T)$ в форме закона $E \sim T^{1/2}$ [39]. Для термоэдс в прыжковой области, что типично для слоистой среды, исследуемой в данной работе, может быть характерной линейная асимптотика:

$$E \sim T. \quad (2)$$

Часто подчеркивается, что имеется отклонение от формулы (2), при котором в области действия закона Мотта термоэдс не зависит от температуры $E_s(T) \sim \text{const}$. Такое поведение может являться следствием специальной формы плотности состояний в окрестности уровня Ферми [37]. В наших исследованиях наблюдается резко неоднородная зависимость термоэдс от температуры, причем в ряде случаев со сменой знака. Для термоэдс в прыжковой области, что типично для слоистой среды, исследуемой в данной работе, может быть характерной линейная асимптотика $E \sim T$.

$$E_s = \frac{\pi^2 k_B}{3e} k_B T \frac{\partial(\ln \sigma(E_F))}{\partial E}, \quad (3)$$

где $\sigma(E_F)$ — проводимость на уровне Ферми; k_B — постоянная Больцмана; e — заряд электрона; T — температура.

Толщина подложки для формирования слоистой среды составляет 0,5 мм, поэтому предварительно исследовано распределение температуры в образцах (рис. 1). Согласно теории термоэлектрического эффекта, известны следующие уравнения распределения температуры и электрического потенциала в металле [34, 43]:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot (ST \cdot (\sigma \cdot (\nabla \phi - S \nabla T))) - \lambda \cdot \nabla T = \dot{q} = E \cdot J; \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \left(\sigma (-\nabla \phi - S \nabla T) - \frac{\partial(\epsilon_0 \cdot \nabla \phi)}{\partial t} \right) = 0, \quad (5)$$

где ρ — плотность материала; c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; T — температура, К; S — коэффициент Зеебека; σ — электропроводность; ϕ — электростатический потенциал; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость; \dot{q} — изменение тепла в единицу времени на единицу объема; E — напряженность электрического поля; J — плотность тока.

Распределение термоэлектрического потенциала в сплаве циркония и ниобия для различного диапазона температур было нами исследовано с помощью программы Comsol (рис. 1). При разнице температур 100 град глубина воздействия теплового поля в точке контакта достигает примерно 0,5 мм. В то же время можно отметить, что разность потенциалов у разных материалов также значительно различается при разных перепадах температур. Это показывает, что в

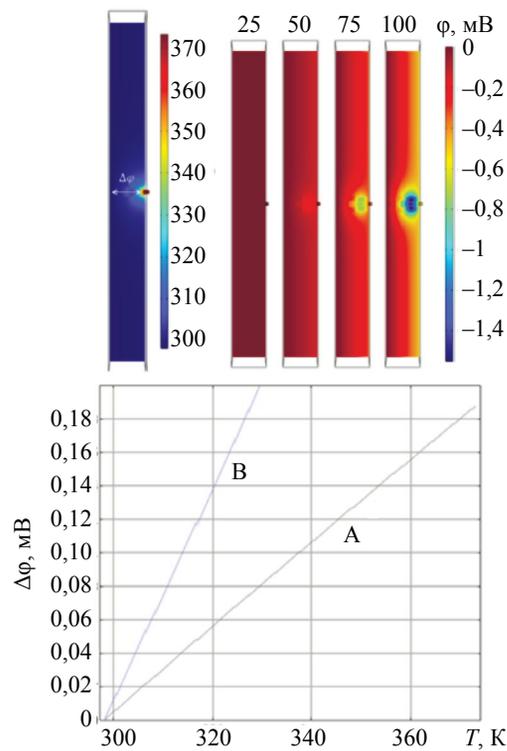


Рис. 1. Распределение термоэлектрического потенциала в материале и изменение разности потенциалов с температурой (толщина 0,5 мм), А — Nb; В — Zr.

исследованном нами диапазоне толщины материала разность потенциалов между двумя точками среды может обоснованно характеризовать изменение внутренних свойств материала.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При гидрировании слоистой среды отмечено, что образование систем слоистая среда—водород происходит несколькими способами. Наиболее простая ситуация характерна для низкой концентрации водорода. Однако введение даже малых количеств водорода в слоистую матрицу вызывает стабильный фазовый переход с изменением структуры (распределение водорода меняется с количеством слоев и их соотношением). Таким образом, водород в слоистой среде изменяет систему своим присутствием, но и образует новой структуру в виде водородной подсистемы, а также изменяет границы и их структуру, и, в конечном счете, требует дополнительного перераспределения энергии.

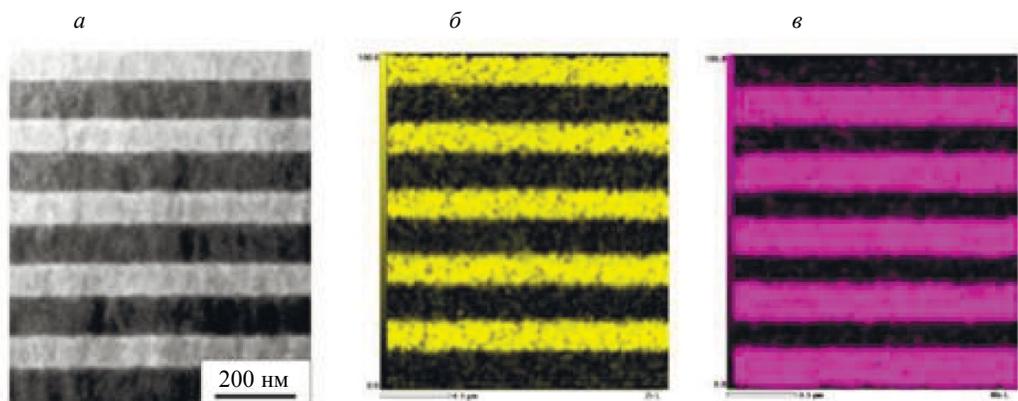


Рис. 2. Энергодисперсионный спектр (ЭДС) поперечного сечения (а) и результаты ЭДС-анализа слоев Zr (б) и Nb (в) в системе Zr/Nb с толщиной слоев 100 нм.

Из рис. 2 следует, что в результате напыления формируются четкая слоистая среда Zr/Nb с толщиной индивидуальных слоев 100 ± 10 нм с четкими границами между отдельными слоями без дефектов. Данные просвечивающей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа (ЭДС) подтверждают образование многослойных структур с четкими границами между слоями циркония (Zr) и ниобия (Nb), напыленных на подложку из кремния. На рис. 2 можно наблюдать четкие контрастные линии, что указывает на хорошее качество слоев и отсутствие интердиффузии между ними. ЭДС-анализ слоев циркония и ниобия показывает равномерное распределение элементов по всему объему покрытия. Отсутствие видимых дефектов, таких как трещины или микропоры, свидетельствует о высоком качестве полученного покрытия. Это подтверждает значительную степень контролируемости процесса осаждения, что важно для создания материалов с заданными физико-химическими свойствами, в частности в условиях радиационного воздействия. Отметим, что при гидрировании из газовой фазы при температуре 650°C наблюдаются искажения слоев вплоть до их разрушения. Послойный анализ среды Zr/Nb после протонного облучения методом оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда (ОЭСТР) показывает интенсивное накопление атомов водорода вблизи границ слоев. Распределение водорода имеет преимущественно бимодальный характер, локальные максимумы концентрации водорода наблюдаются на границах раздела Nb/Zr, в то время как на границе раздела Zr/Nb накопление значительно ниже, при этом локализация водорода вблизи границ происходит преимущественно в окрестности циркония. Преимущественная локализация водорода вблизи границ со стороны циркония обусловлена существенным отличием энергии связи водорода в каждом атомном слое Zr/Nb. С увеличением расстояния от границы в слое Zr данное снижение происходит медленнее, чем в слоях Nb. Таким образом, облучение протонами многослойных систем Zr/Nb приводит к асимметричному распределению внедренных ионов водорода, которые накапливаются преимущественно на границе Nb/Zr, при этом локализация водорода вблизи границ происходит в окрестности циркония.

В качестве инструмента исследования среды дополнительно использован метод измерения термоэдс (термоэлектрический метод). Данные измерений термоэдс приведены на рис. 3—6 и в табл. 1. Слоистая среда в присутствии водорода сильно изменяет свойства металлов, происходит изменение структуры, в результате которого система, способная поглотить незначительное количество водорода, превращается в систему, где с каждым слоем металла может быть связано значительно большее количество атомов водорода (см. рис. 3). Возможно образование водородной подсистемы металл—водород вдоль границы слоя так, как и системы водород—водород. Отношение $E_s(100)/E_s(10)$ (см. рис. 3), определяемое по формуле (1), показывает усредненное значение специальной формы плотности состояний в окрестности уровня Ферми. Ее величина изменяется (см. рис. 3) более, чем в 5 раз.

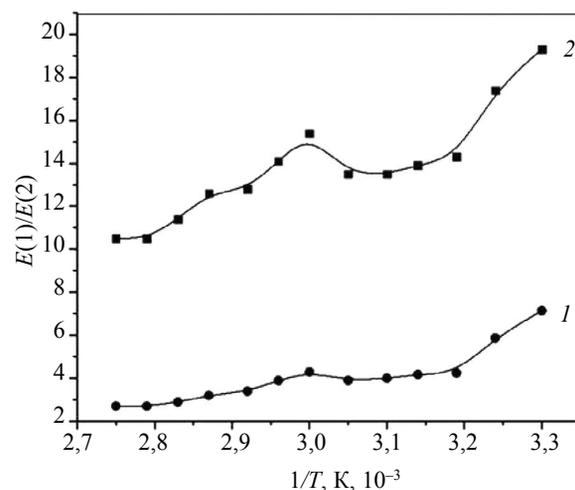


Рис. 3. Зависимость относительной термоэдс от обратной температуры для разного соотношения количества слоев: 1 — для облученного протонами образца 100/100; 2 — необлученные образцы 100/100 слоев.

Наблюдается заметное различие в поведении термоэдс облученных (кривая 3) и необлученных слоев (кривая 1) с резким изменением проводимости среды (рис. 4).

Результаты рис. 5 свидетельствуют, что коэффициент Зеебека $S_T = \Delta E/\Delta t$ слоистой среды с числом слоев 10/10 при облучении протонами по сравнению с необлученной увеличивается с

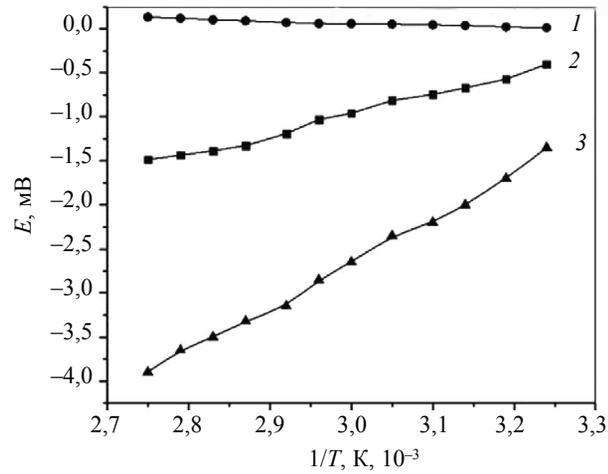


Рис. 4. Зависимость термоэдс от $1/T$: 1 — 100/100; 2 — 10/10; 3 — облученный 100/100.

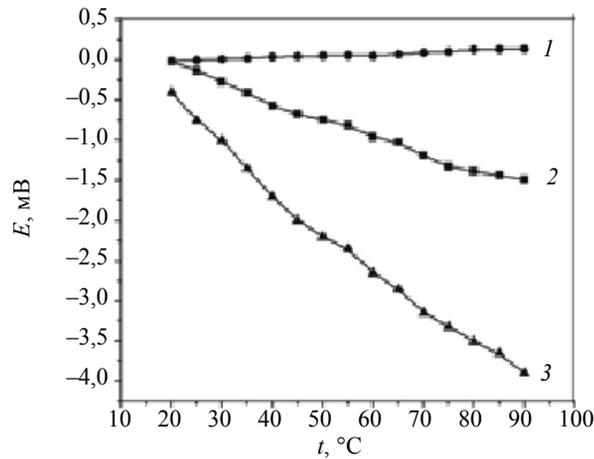


Рис. 5. Зависимость термоэдс слоистой среды Zr/Nb от температуры: 1 — 100/100 (без облучения); 2 — 10/10 (без облучения); 3 — образец 2 (облучение протонами с энергией 1,75 МэВ, ток 33 мкА, время 120 мин).

0,020 до 0,057 мВ/К. Для среды 100/100 (без облучения) его величина равна 0,006 мВ/К. Как и следовало ожидать, наблюдается преобладание иных носителей тока. Это свидетельствует о том, что на границах среды не возникает существенных барьеров для движения водорода.

Таблица 1

Изотермы слоистой среды для различного соотношения слоев

Температура, °С	10/10 без облучения	100/100 без облучения	100/100 с облучением
45	-0,67	0,05	-2,00
65	-1,03	0,07	-2,85
95	-1,54	0,15	-4,20

Как видно из табл. 1, значения термоэдс весьма чувствительны к изменению числа слоев и гидрированию. На рис. 6 для сравнения приведены изменения термоэдс однородной среды (смесь однородных сплавов). Заметим, что инверсия значений термоэдс, наблюдаемая по данным табл. 1, характерна также не только для слоистой среды, но зависит и от концентрации водорода (рис. 6). Этот результат аналогичен данным работы [43].

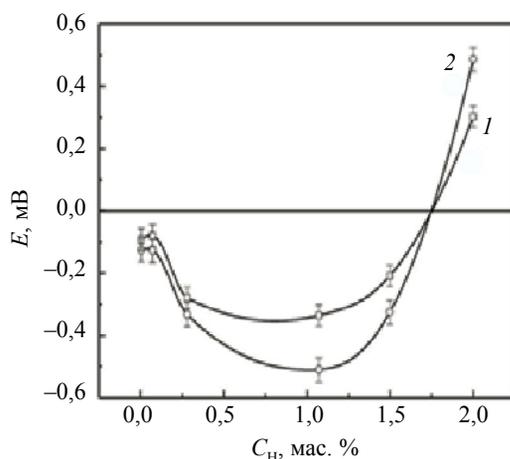


Рис. 6. Изотермы термоэдс в зависимости от концентрации водорода в сплаве Э110 (1 — $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$).

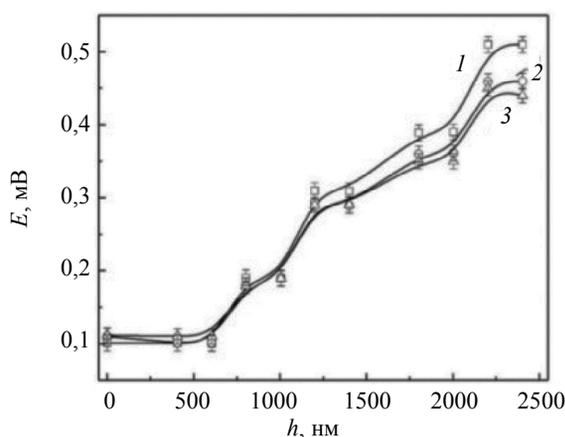


Рис. 7. Влияние толщины покрытия ниобием на цирконий на величину термоэдс (по абсолютной величине) в условиях различной величины нагрузки на зонд (1 — сила прижатия зонда к образцу сплава циркония равна 0,3 Н; 2 — 0,2 Н; 3 — без нагрузки). Концентрация водорода во всех случаях равна 1,07 мас. %.

Из рис. 7 следует, что наблюдается ступенчатая зависимость термоэдс по глубине однородного сплава, что связано, видимо, с прыжковым характером термоэдс, обусловленной наличием водорода [17, 22, 24]. Отметим, что слоистость, благодаря водороду, может формироваться [42] спонтанно. При увеличении концентрации водорода образующиеся дефекты вносят положительный вклад в термоэдс и имеют дислокационную природу (см. рис. 7). Например, изменение толщины покрытия никеля приводит к появлению прыжковой проводимости полученного материала. Это явление хорошо наблюдается на рис. 7. Данный вывод подтверждается наличием плато на всех графиках и может быть объяснен изменением плотности электронных состояний на границе цирконий—ниобий. Ее величина зависит также от концентрации водорода.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ВЫВОДЫ

1. Гидрирование протонами снижает дефектность многослойной структуры наноразмерных пленок на основе Nb/Zr в отличие от других методов гидрирования.

2. Показано, что оптимальными режимами для получения наноразмерных слоев Zr/Nb для покрытий с толщиной индивидуальных слоев 100 нм является давление 700 Па, мощность 40 Вт, частота 2 кГц, коэффициент заполнения плазмы 12,5 %. Для покрытий с толщиной индивидуальных слоев от 10 до 50 нм оптимальное давление 650 Па, мощность 40 Вт, частота 1 кГц, коэффициент заполнения плазмы 12,5 %. Для реализации четких границ между слоями необходимая мощность составляет 37,9 Вт/см² для Zr, для Nb-мишени — 26,4 Вт/см².

3. Величина термоэдс слоистых материалов на основе пленок Nb/Zr существенно зависит от количества слоев и содержания водорода, что позволяет использовать для анализа данного рода материалов.

5. Выявлено, что при протонном облучении происходит интенсивное накопление атомов водорода вблизи границ слоев, что вызывает изменение термоэдс вплоть до инверсии ее знака.

6. Распределение водорода имеет бимодальный характер, локальные максимумы концентрации водорода наблюдаются на границах раздела Nb/Zr, в то время как на границе раздела Zr/Nb накопление водорода значительно ниже. Локализация водорода вблизи границ происходит преимущественно в окрестности циркония.

Исследование выполнено по Программе «Приоритет 2030» ТПУ при финансовой поддержке Государственного задания «Наука» в рамках научного проекта № FSWW-2023-0005 с использованием научного оборудования Центра коллективного использования ТПУ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Y., Feng Z., Haq L., Huang L., Xin Ch., Wang Y., Bilotti E., Essa Kh., Zhang H., Li Z., Yan F., Peijs T. A Review on Functionally Graded Materials and Structures via Additive Manufacturing: From Multi-Scale Design to Versatile Functional Properties // *Advanced Materials Technologies*. John Wiley & Sons, Ltd. 2020. V. 5. P. 1900981.
2. Bhattacharyya A., Maurice D. Residual stresses in functionally graded thermal barrier coatings // *Mechanics of Materials*. Elsevier. 2019. V. 129. P. 50—56.
3. Суфияров В.Ш., Орлов А.В., Борисов Е.В., Полозов И.А., Попович А.А., Чуковенкова М.О., Соклаков А.В., Михалюк Д.С. Конечно-элементное моделирование одноосного растяжения образцов из функционально-градиентного материала с использованием мультилинейной модели пластичности // *ЖТФ*. 2021. Т. 91. Вып. 1. С. 26—31.
4. Onishchenko D.V., Popovich A.A., Wang X.S. Synthesis of the nanodimensional powder of tungsten carbide for the development of functional nanocomposite coatings // *Russ. J. Non-ferrous Metals*. 2013. V. 54. P. 246—251.
5. Попович А.А. Аддитивные технологии как новый способ создания перспективных функциональных материалов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2020. № 1 (775). С. 19—25.
6. Попович А.А., Борисов Е. В., Суфияров В.Ш., Попович А.А. Формирование заданных свойств функционально-градиентного сплава Inconel 718 с использованием аддитивных технологий // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. № 11 (761). С. 14—22.
7. Orlov A. V., Orlov V.S., Sufiarov V.S., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V., Popovich A.A., Chukovenkova M.O., Soklakov A.V., Mikhaluk D.S. Numerical simulation of the inelastic behavior of a structurally graded material // *Letters on Materials*. 2019. No. 9. P. 97—102.
8. Silverstein R., Eliezer D. Hydrogen trapping in 3D-printed (additive manufactured) Ti-6Al-4V // *Materials Characterization*. 2018. V. 144. P. 297—304.
9. Metalnikov P., Eliezer D., Ben-Hamu G. Hydrogen trapping in additive manufactured Ti-6Al-4V alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. V. 811. P. 141050.
10. Panin V.E., Panin S.V., Shugurov A.R. The Effect of Nanoscale Mesoscopic Structural States Associated with Lattice Curvature on the Mechanical Behavior of Ti-6Al-4V Alloy // *Physical Mesomechanics*. 2020. V. 23. P. 457—465.
11. Boyangin E.N., Perevalova O.B., Panin A.V., Martynov S.A. The Effect of Electron Beam Welding on the Microstructure and Microhardness of 3D-Printed Products from Titanium Alloy Ti-6Al-4V // *Physics of Metals and Metallography*. 2021. V. 122. P. 41—147.
12. Navi N.U., Sabatani E. Hydrogen effects on electrochemically charged additive manufactured by electron beam melting (EBM) and wrought Ti-6Al-4V alloys // *Int. J. of Hydrogen Energy*. 2020. V. 45. P. 25523—25540.
13. Brosh E., Navi N.U., Rozen B.A., Noam Eliaz. Microvoids in electrochemically hydrogenated titanium-based alloys // *Intern. Journal of Hydrogen Energy*. 2021. V. 46. P. 27234—27242.
14. Svetlizky D., Das M., Zheng B., Vyatskikh A., Bose S., Bandyopadhyay A., Julie M., Schoenung J.M., Enrique J., Lavernia E.J., Eliaz Noam. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics defects, challenges and applications // *Materials Today*. 2021. V. 49. P. 271—295.
15. Doğu M.N., Ezen Z., Davud K., Tan E. Microstructural and texture evolution during thermo-hydrogen processing of Ti6-Al-4V alloys produced by electron beam melting // *Materials Characterization*. 2020. V. 168. P. 110549.
16. Bilgin G.M., Esen Z., Akin S.K., Dericioglu A.F. Optimization of the mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting using thermohydrogen processes // *Materials Science and Engineering*. 2017. V. 700. P. 574—582.
17. Callisti M., Karlik M., Polcar T. Competing mechanisms on the strength of ion-irradiated Zr/Nb nanoscale multilayers: Interface strength versus radiation hardening // *Scripta Materialia. Acta Materialia Inc*. 2018. V. 152. P. 31—35.
18. Sen H.S., Polcar T. Vacancy-interface-helium interaction in Zr-Nb multi-layer system: A first-principles study // *Journal of Nuclear Materials*. 2019. V. 518. P. 11—20.

19. Monclús M.A., Callisti M., Polcar T., Lozano-Perez S., Yang L.W., Llorca J., Molina-Ajdareguia J.M. Selective oxidation-induced strengthening of Zr/Nb nanoscale multilayers // *Acta Materialia*. 2017. V. 122. P. 1—10.
20. Daghbouj D., Callisti M., Sen H.S., Karlic M., Cech J., Vronka M., Havranek V., Capek J., Minarec P., Bobar B., Polcar T. Interphase boundary layer-dominated strain mechanisms in Cu+ implanted Zr-Nb nanoscale multilayers // *Acta Materialia*. Acta Materialia Inc. 2021. V. 202. P. 317—330.
21. Callisti M., Lozano-Perez S., Polcar T. Structural and mechanical properties of γ -irradiated Zr/Nb multilayer nanocomposites // *Materials Letters*. 2016. V. 163. P. 138—141.
22. Frutos E., Polcar T., Callisti M., Karlik M. Length-scale-dependent mechanical behaviour of Zr/Nb multilayers as a function of individual layer thickness // *Materials Science and Engineering A*. 2015. V. 632. P.137—146.
23. Monclús M.A., Callisti M., Polcar T., Yang L.W., Molina-Ajdareguia J.M., Llorca J. Effect of layer thickness on the mechanical behaviour of oxidation-strengthened Zr/Nb nanoscale multilayers // *Journal of Materials Science*. 2018. V. 53. P. 5860—5878.
24. Варламов А.А., Кавокин А.В., Лукьянчук И.А. Шапанов С.Г. Аномальные термоэлектрические и терромагнитные свойства графена // *УФН*. Т. 182. С. 1229—1234.
25. Geim K.L. Status and Prospects // *Science*. 2009. V. 324. P. 1530.
26. Grosse, K.L., Bae M.H., Lian F., King W.P. Nanoscale Joule heating, Peltier cooling and current crowding at graphene–metal contacts // *Nature Nanotech*. 2011. V. 6. P. 287—290.
27. Pick M.A., Sonnenberg K.A. Model for atomic hydrogen-metal interactions—application to recycling, recombination and permeation // *J. Nucl. Mater*. 1985. V. 131. P. 208—220.
28. Serra E., Benamati G., Ogorodnikova O.V. Hydrogen isotopes transport parameters in fusion reactor materials // *J. Nucl. Mater*. 1998. V. 255. P. 105—115.
29. Puls M.P. The effect of hydrogen and hydrides on the integrity of zirconium alloy components: delayed hydride cracking. London: Springer Science & Business Media, 1991. P. 237—246.
30. Choudhuri G., Mukherjee P., Gayathri N., Kain V., Kumar M.K., Srivastava D., Basu S., Mukherjee D., Dey G.K. Effect of heavy ion irradiation and $\alpha+\beta$ phase heat treatment on oxide of Zr-2.5 Nb pressure tube material // *J. Nucl. Mater*. 2017. V. 489. P. 22—32.
31. Xu F., Zhang X., Zhang H. A review on functionally graded structures and materials for energy absorption // *Engineering Structures*. 2018. V. 171. P. 309—325.
32. Wang F., Li R., Ding C., Wan J., Yu R., Wang Z. Effect of catalytic Ni coating with different depositing time on the hydrogen storage properties of ZrCo alloy // *Int. J. Hydrogen Energy* 2016. V. 41. P. 17421—17432.
33. Gao B., Hao S., Zou J., Wu W., Tu G., Dong C. Effect of high current pulsed electron beam treatment on surface microstructure and wear and corrosion resistance of an AZ91HP magnesium alloy // *Surf. Coat. Technol*. 2007. V. 201. P. 6297—6303.
34. Чернов И.П., Иванова С.В., Крёнинг М.К., Коваль Н.В., Ларионов В.В., Лидер А.М., Степанова Е.Н., Степанова О.М., Черданцев Ю.П. Свойства и структурное состояние поверхностного слоя циркониевого сплава, модифицированного импульсным электронным пучком и насыщенного водородом // *ЖТФ*. 2012. Т. 57. С. 392—398.
35. Lider A.M., Larionov V.V., Syrtanov M.S. Hydrogen concentration measurements at titanium layers by means of thermo-EMF // *Key Eng. Mater*. 2016. V. 683. P. 199—202.
36. Askhatov A., Larionov V.V., Kudiyarov V.N. Analysis of hydrogenated zirconium alloys irradiated with gamma-rays // *In MATEC Web of Conferences*. 2017. V. 102. P. 1003—1006.
37. Звягин И.П. Кинетические явления в неупорядоченных полупроводниках. М.: МГУ, 1984. 192 с.
38. Демидов С.В., Кондрин М.В., Пирнин А.А., Случанко Н.Е., Самарин Н.А., Ляпин А.Г., Бискупский Дж. Термоэдс в области прыжковой проводимости: переход от формулы Мотта к формуле Звягина // *Письма в ЖТФ*. 1998. Т. 68. С. 801—806.
39. Mott N.F., Davis E.A. Electronic processes in non-crystalline materials. Oxford University Press. 2nd ed. Edition. 2012. 608 p.
40. Antonova E.E., Looman D.C. Finite elements for thermoelectric device analysis in ANSYS / *Int. Conf. Thermoelectr. ICT, Proc. IEEE*. 2005. P. 200—203.
41. Lotkov A.I., Grishkov V.N., Laptev R. S., Mironov Yu. P., Zhapova D. Yu., Girsova N.V., Gusarenko A.A., Barmina E.G., Kashina O.N. Crystal Structure Defects in Titanium Nickelide after Abc pressing at Lowered Temperature // *Materials*. 2022. V. 15. P. 1—15.
42. Callisti M., Karlik M., Polcar T. Competing mechanisms on the strength of ion-irradiated Zr/Nb nanoscale multilayers: Interface strength versus radiation hardening // *Scripta Materialia*. Acta Materialia Inc. 2018. V. 152. P. 31—35.
43. Xu Shupeng, Larionov V.V., Soldatov A. and Chang Jianglei. Analysis for hydrogen concentration in titanium alloys using Multi-frequency eddy current // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. V. 70. P. 1001408.

REFERENCES

1. Li Y., Feng Z., Haq L., Huang L., Xin Ch., Wang Y., Bilotti E., Essa Kh., Zhang H., Li Z., Yan F., Peijs T. A Review on Functionally Graded Materials and Structures via Additive Manufacturing: From

Multi-Scale Design to Versatile Functional Properties // *Advanced Materials Technologies*. John Wiley & Sons, Ltd. 2020. V. 5. P. 1900981.

2. *Bhattacharyya A., Maurice D.* Residual stresses in functionally graded thermal barrier coatings // *Mechanics of Materials*. Elsevier. 2019. V. 129. P. 50—56.

3. *Sufiiarov V., Orlov F., Bonsov E., Polozov I.* Computer Modelling of Uniaxial Tension of Functionally Gradient Material Produced by Additive Manufacturing // *Technical Physics*. 2021. V. 66. P. 23—27.

4. *Onishchenko D.V., Popovich A.A., Wang X.S.* Synthesis of the nanodimensional powder of tungsten carbide for the development of functional nanocomposite coatings // *Russ. J. Non-ferrous Metals*. 2013. V. 54. P. 246—251.

5. *Popovich A.A.* Additive Technologies as Breakthrough Solutions for Creating Advanced Functional Materials // *Metal Science and Heat Treatment*. 2020. V. 62. P. 18—24.

6. *Popovich V.A., Borisov E., Sufiiarov V.* Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties // *Materials & Design*. 2016. V. 114. P. 441—449.

7. *Orlov A.V., Orlov V.S., Sufiiarov V.S., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V., Popovich A.A., Chukovenkova M.O., Soklakov A.V., Mikhaluk D.S.* Numerical simulation of the inelastic behavior of a structurally graded material // *Letters on Materials*. 2019. V. 9. P. 97—102.

8. *Silverstein R., Eliezer D.* Hydrogen trapping in 3D-printed (additive manufactured) Ti-6Al-4V // *Materials Characterization*. 2018. V. 144. P. 297—304.

9. *Metalnikov P., Eliezer D., Ben-Hamu G.* Hydrogen trapping in additive manufactured Ti-6Al-4V alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. V. 811. P. 141050.

10. *Panin V.E., Panin S.V., Shugurov A.R.* The Effect of Nanoscale Mesoscopic Structural States Associated with Lattice Curvature on the Mechanical Behavior of Ti-6Al-4V Alloy // *Physical Mesomechanics*. 2020. V. 23. P. 457—465.

11. *Boyangin E.N., Perevalova O.B., Panin A.V., Martynov S.A.* The Effect of Electron Beam Welding on the Microstructure and Microhardness of 3D-Printed Products from Titanium Alloy Ti-6Al-4V // *Physics of Metals and Metallography*. 2021. V. 122. P. 41—147.

12. *Navi N.U., Sabatani E.* Hydrogen effects on electrochemically charged additive manufactured by electron beam melting (EBM) and wrought Ti-6Al-4V alloys // *Int. J. of Hydrogen Energy*. 2020. V. 45. P. 25523—25540.

13. *Brosh E., Navi N.U., Rozen B.A., Noam Eliaz.* Microvoids in electrochemically hydrogenated titanium-based alloys // *Intern. Journal of Hydrogen Energy*. 2021. V. 46. P. 27234—27242.

14. *Svetlizky D., Das M., Zheng B., Vyatskikh A., Bose S., Bandyopadhyay A., Julie M., Schoenung J.M., Enrique J., Lavernia E.J., Eliaz Noam.* Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics defects, challenges and applications // *Materials Today*. 2021. V. 49. P. 271—295.

15. *Doğu M.N., Ezen Z., Davud K., Tan E.* Microstructural and texture evolution during thermo-hydrogen processing of Ti6-Al-4V alloys produced by electron beam melting // *Materials Characterization*. 2020. V. 168. P. 110549.

16. *Bilgin G.M., Z. Esen Z., Akın S.K., Dericioglu A. F.* Optimization of the mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting using thermohydrogen processes // *Materials Science and Engineering*. 2017. V. 700. P. 574—582.

17. *Callisti M., Karlik M., Polcar T.* Competing mechanisms on the strength of ion-irradiated Zr/Nb nanoscale multilayers: Interface strength versus radiation hardening // *Scripta Materialia. Acta Materialia Inc*. 2018. V. 152. P. 31—35.

18. *Sen H.S., Polcar T.* Vacancy-interface-helium interaction in Zr-Nb multi-layer system: A first-principles study // *Journal of Nuclear Materials*. 2019. V. 518. P. 11—20.

19. *Monclús M.A., Callisti M., Polcar T., Lozano-Perez S., Yang L.W., LLorca J., Molina-Ajdareguia J.M.* Selective oxidation-induced strengthening of Zr/Nb nanoscale multilayers // *Acta Materialia*. 2017. V. 122. P. 1—10.

20. *Daghbouj D., Callisti M., Sen H.S., Karlic M., Cech J., Vronka M., Havranek V., Capek J., Minarec P., Bobar B., Polcar T.* Interphase boundary layer-dominated strain mechanisms in Cu+ implanted Zr-Nb nanoscale multilayers // *Acta Materialia. Acta Materialia Inc*. 2021. V. 202. P. 317—330.

21. *Callisti M., Lozano-Perez S., Polcar T.* Structural and mechanical properties of γ -irradiated Zr/Nb multilayer nanocomposites // *Materials Letters*. 2016. V. 163. P. 138—141.

22. *Frutos E., Polcar T., Callisti M., Karlik M.* Length-scale-dependent mechanical behaviour of Zr/Nb multilayers as a function of individual layer thickness // *Materials Science and Engineering A*. 2015. V. 632. P. 137—146.

23. *Monclús M.A., Callisti M., Polcar T., Yang L.W., Molina-Ajdareguia J.M., LLorca J.* Effect of layer thickness on the mechanical behaviour of oxidation-strengthened Zr/Nb nanoscale multilayers // *Journal of Materials Science*. 2018. V. 53. P. 5860—5878.

24. *Varlamov A.A., Kavokin A.V., Lukianchuk I.A., Sharapov S.G.* Anomalous thermoelectric and thermomagnetic properties of grapheme // *UFN*. 2012. V. 182. P. 1229—1234.

25. *Geim K.L.* Status and Prospects // *Science*. 2009. V. 324. P. 1530.

26. *Grosse, K.L., Bae M.H., Lian F., King W.P.* Nanoscale Joule heating, Peltier cooling and current crowding at graphene-metal contacts // *Nature Nanotech*. 2011. V. 6. P. 287—290.

27. *Pick M.A., Sonnenberg K.A.* Model for atomic hydrogen-metal interactions—application to recycling, recombination and permeation // *J. Nucl. Mater.* 1985. V. 131. P. 208—220.
28. *Serra E., Benamati G., Ogorodnikova O.V.* Hydrogen isotopes transport parameters in fusion reactor materials // *J. Nucl. Mater.* 1998. V. 255. P. 105—115.
29. *Puls M. P.* The effect of hydrogen and hydrides on the integrity of zirconium alloy components: delayed hydride cracking. London: Springer Science & Business Media, 1991. P. 237—246.
30. *Choudhuri G., Mukherjee P., Gayathri N., Kain V., Kumar M.K., Srivastava D., Basu S., Mukherjee D., Dey G.K.* Effect of heavy ion irradiation and $\alpha + \beta$ phase heat treatment on oxide of Zr-2.5 Nb pressure tube material // *J. Nucl. Mater.* 2017. V. 489. P. 22—32.
31. *Xu F., Zhang X., Zhang H.* A review on functionally graded structures and materials for energy absorption // *Engineering Structures.* 2018. V. 171. P. 309—325.
32. *Wang F., Li R., Ding C., Wan J., Yu R., Wang Z.* Effect of catalytic Ni coating with different depositing time on the hydrogen storage properties of ZrCo alloy // *Int. J. Hydrogen Energy* 2016. V. 41. P. 17421—17432.
33. *Gao B., Hao S., Zou J., Wu W., Tu G., Dong C.* Effect of high current pulsed electron beam treatment on surface microstructure and wear and corrosion resistance of an AZ91HP magnesium alloy // *Surf. Coat. Technol.* 2007. V. 201. P. 6297—6303.
34. *Chernov I.P., Ivanova S.V., Krening M.K., Koval N., Larionov V.V., Lider A.M., Pushilina N.S., Stepanova E.N., Stepanova O.M., Cherdantsev Yu. P.* Properties and structural state of the surface layer in a zirconium alloy modified by a pulsed electron beam and saturated by hydrogen // *Tech. Phys.* 2012. V. 57. P. 392—398.
35. *Lider A.M., Larionov V.V., Syrtanov M.S.* Hydrogen concentration measurements at titanium layers by means of thermo-EMF // *Key Eng. Mater.* 2016. V. 683. P. 199—202.
36. *Askhatov A., Larionov V.V., Kudiyarov V.N.* Analysis of hydrogenated zirconium alloys irradiated with gamma-rays // In *MATEC Web of Conferences.* 2017. V. 102. P. 1003—1006.
37. *Zvyagin I.P.* Kineticheskie yavleniya v neuporyadochennykh poluprovodnikah. M.: MGU, 1984. 192 p. (In Russia).
38. *Demishev S.V., Kondrin M.V., Pirnin A.A., Sluchanko N.E., Samarin N.A., Lyapin A.G., Biskupski Dz.* Termoeds v oblasti pryzhkovoy provodimosti: perekhod ot formuly Motta k formule Zvyagina // *Pis'ma v ZHETF.* 1998. V. 68. P. 801—806 (in Russia).
39. *Mott N. F., Davis E. A.* Electronic processes in non-crystalline materials. Oxford University Press. 2nd ed. Edition. 2012. 608 p.
40. *Antonova E.E., Looman D.C.* Finite elements for thermoelectric device analysis in ANSYS / *Int. Conf. Thermoelectr. ICT, Proc. IEEE.* 2005. P. 200—203.
41. *Lotkov A.I., Grishkov V.N., Laptev R. S., Mironov Yu. P., Zhapova D.Yu., Girsova N.V., Gusarenko A.A., Barmina E.G., Kashina O.N.* Crystal Structure Defects in Titanium Nickelide after Abc pressing at Lowered Temperature // *Materials.* 2022. V. 15. P. 1—15.
42. *Callisti M., Karlik M., Polcar T.* Competing mechanisms on the strength of ion-irradiated Zr/Nb nanoscale multilayers: Interface strength versus radiation hardening // *Scripta Materialia. Acta Materialia Inc.* 2018. V. 152. P. 31—35.
43. *Xu Shupeng, Larionov V.V., Soldatov A. and Chang Jianglei.* Analysis for hydrogen concentration in titanium alloys using Multi-frequency eddy current // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.* 2020. V. 70. P. 1001408.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИНОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ПОЧВЕ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕРМОГРАФИИ

© 2024 г. Хао Янг¹, Ян Ян¹, Сианлонг Лиу^{1,**}, Хонжин Ванг^{2,***}, Ююн Хоу³, В.П. Вавилов^{4,*}

¹Хунаньский институт инжиниринга конструкций, Хунань, Сиантан, 418000 Китай

²Колледж электрического и информационного инжиниринга, Университет Хунаня, Чангша, 410082 Китай

³Компания Минг Янг «Умная энергия», Жогшан, Гуандонг 528400 Китай

⁴Институт неразрушающего контроля, Томский политехнический университет, Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7

E-mail: *vavilov@tpu.ru; **xianglongliu@163.net; ***hongjinwang2017@outlook.com

Поступила в редакцию 05.06.2024; после доработки 09.07.2024

Принята к публикации 12.07.2024

Предложен метод обнаружения инородных объектов, таких как металлические и пластиковые емкости, банки, бутылки и т.п., в почвах сельскохозяйственного назначения, основанный на использовании инфракрасной термографии для мониторинга динамических температурных распределений на поверхности почвы. Показано, что изменение солнечной иррадиации в ходе суточного цикла приводит к динамическим температурным сигналам над скрытыми объектами, амплитуда которых зависит от мощности солнечного излучения, влажности почвы и контраста теплофизических свойств между материалом объекта и почвой. Экспериментально исследовано влияние факторов окружающей среды на эффективность обнаружения скрытых объектов по их поверхностным температурным отметкам. Эксперименты проводили на имитаторах промышленных отходов в виде банок из алюминия и полиэтилентерефталата, размещенных на различных глубинах в песке с различной влажностью. Применение алгоритма так называемого восстановления теплового псевдопотока для обработки исходных термограмм позволило улучшить выявляемость подповерхностных объектов за счет снижения влияния диффузии тепла в поперечных направлениях. Предложенный метод эффективен и безвреден для людей и окружающей среды.

Ключевые слова: обнаружение твердых отходов, инфракрасная термография, неразрушающий контроль, обработка данных, алгоритм восстановления теплового псевдопотока.

EVALUATING EFFICIENCY OF FOREIGN OBJECT DETECTION TECHNOLOGY BASED ON THE USE OF PASSIVE INFRARED THERMOGRAPHY

© 2024 Hao Yang¹, Yan Yan¹, Xianglong Liu^{1,**}, Hongjin Wang^{2,***}, Yuejun Hou³, V.P. Vavilov^{4,*}

¹Hunan institute of engineering construction project academy, Hunan, Xiangtan, 418000 China

²College of electrical and Information engineering, Hunan University, Changsha, 410082 China

³Ming Yang Smart Energy Group Limited, Zhongshan, Guangdong, 528400 China

⁴Institute of nondestructive testing, Tomsk Polytechnic University, Russia 634028 Tomsk, Savinykh St., 7

E-mail: *vavilov@tpu.ru; **xianglongliu@163.net; ***hongjinwang2017@outlook.com

A new method for detecting subsurface solid objects buried in farmlands, such as plastic bottles, wasted cans, etc., has been proposed by applying the technique of infrared (IR) thermography to monitor the temperature of soil surface subjected to solar irradiation. Through both experimentation and simulation, this study parameterizes the influence of environmental factors on IR images and validates the detection capabilities of the method. To verify the feasibility of IR thermography testing, the experimental section of the work is devoted to monitoring aluminum and polyethylene terephthalate cans buried in sand with varying grades of moisture. The dependencies between the efficiency of foreign object detection and their depth are derived. A restoring pseudothermal flux algorithm was used to reduce the impact of lateral diffusion on IR thermographic detection of foreign objects buried in soil. Variations of soil temperature caused by varying solar radiation during multiple day-night cycles are used to improve the detectable diameter-depth ratio. The described technique is efficient and provides no harm to human beings.

Keywords: land solid waste detection, infrared thermography, nondestructive testing, simulation.

DOI: 10.31857/S0130308224080035

ВВЕДЕНИЕ

Твердые промышленные отходы, такие как пластиковые и металлические банки и бутылки, источники питания и т.п., загрязняют почву и подземные воды и могут угрожать здоровью людей [1]. Присутствие инородных предметов может серьезно сокращать ресурс беспилотных сельскохозяйственных машин, увеличивая, таким образом, расходы на их обслуживание [2].

Существующие средства очистки земной поверхности от твердых предметов, как правило, предусматривают ручной труд или используют принцип электромагнитной индукции [3]. Применение беспилотных летательных аппаратов обеспечило быстрое обнаружение инородных предметов на поверхности почвы с использованием методов анализа изображений, что позволило снизить операционные расходы. Тем не менее, даже в сельском хозяйстве не все инородные предметы находятся на поверхности почвы, а подповерхностные объекты могут существенно вредить машинной технике [2, 4].

Инфракрасная (ИК) термография является многообещающим методом обнаружения инородных предметов в почве [5]. Deans и др. предложили комбинировать микроволновую технику с ИК-термографией для повышения вероятности обнаружения скрытых в почве объектов [6]. Yali Wang разработал метод анализа проходящего ИК-излучения с использованием радиационных характеристик фона [7]. Pracht и Świdorski исследовали возможность и эффективность ИК-термографического контроля композиционных материалов, что заложило основы обнаружения инородных объектов в почве [8]. В более широком смысле речь идет о применении теплового контроля (ТК) для анализа структуры твердых тел [9]. Loganathan и др. использовали ИК-термографию для анализа процесса монотонного нагружения армированных композитов [10]. Hongjin Wang и др. предложили новый метод теплового контроля углепластикового композита, который основан на принципе так называемого восстановления теплового псевдопотока (reduction pseudo heat flow method — RPHF); это позволило решить проблему неоднородного нагрева и «поперечной» диффузии тепла [11]. В более поздних исследованиях, в алгоритм обработки данных был введен блок выделения характеристик дефектов, что позволило обнаруживать инородные объекты в почве [12—16]. Близкое исследование было выполнено Strag и Świdorski [17], а также Nüßler и Jonuscheit [18]. Vavilov и др. исследовали особенности обнаружения имитаторов противопехотных мин в почве при изменяющихся погодных условиях и солнечной радиации [19, 20].

Предполагается, что соответствующее моделирование тестовых ситуаций способно улучшить результаты контроля и верифицировать экспериментальные данные. Florides и Kalogirou проанализировали изменение температуры по глубине почвы, создав тем самым теоретические предпосылки для дальнейшего развития ИК-термографического контроля заглубленных объектов [21]. Pręgowski и др. использовали решение трехмерной задачи теплопроводности для оценки того, как результаты теплового метода в комбинации с микроволновым контролем зависят от температуры воздуха, влажности почвы и присутствия в ней минеральных частиц [22]. Yan Duan и др. рассмотрели влияние влагосодержания на теплопроводность песка и получили соответствующее линейное уравнение, тем самым облегчив моделирование дефектных ситуаций [23]. Guozeng Liu и др. исследовали методы неразрушающего контроля (НК) в применении к сотовым сэндвичным панелям, продемонстрировав эффективное выявление зон со скрытой водой в гемопоэтических стволовых клетках [24]. Zorin и Krasnenkov применили комплекс Microlab-Z2 для диагностики металлических структур [25]. Rongxin Sun и др. исследовали связь нелинейных коэффициентов, полученных в результате частотного анализа, с параметрами трещин в композитах [26]. В качестве дополнения к концепции НК был предложен индекс повреждаемости для количественной оценки разрушения и длины распространения трещины.

В настоящем исследовании проанализировано применение пассивной ИК-термографии для обнаружения твердых предметов в зонах ведения сельского хозяйства с использованием естественного солнечного нагрева. Исследованы ряд факторов, влияющих на результаты ИК-термографического контроля, а именно времени суток, температуры окружающей среды, погодных условий и теплофизических характеристик скрытых объектов.

ПРИНЦИП ДИНАМИЧЕСКОГО ИК-ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Пассивная ИК-термография является процедурой ТК с использованием естественных источников тепла, а именно Солнца, окружающей среды, геотермальных источников и т.п., что позволяет выявлять тепловые аномалии на поверхности твердых тел в квазистационарном режиме. При этом не требуется применять дополнительные источники нагрева, как это предусмотрено в классических процедурах активного ТК.

Таким образом, ИК-термографическая техника является на самом деле неразрушающей и позволяет обнаруживать дефекты сравнительно большого размера, в частности, инородные предметы, зоны структурных неоднородностей, скрытые источники тепла, расслоения в строительных конструкциях и т.п. Сущность метода состоит в регистрации и анализе естественного теплового излучения тел с помощью ИК-тепловизора. Тепловые (температурные) аномалии на поверхности объектов контроля, называемые отметками (индикациями), могут быть идентифицированы как поверхностные «отпечатки» скрытых дефектов. В некоторых случаях дополни-

тельным преимуществом ТК является то, что многие неметаллы обнаруживают прозрачность в ИК-части спектра, что позволяет обнаруживать дефекты на больших глубинах по сравнению с рентгеновским и ультразвуковым контролем. Технику ТК используют для неразрушающих испытаний в авиакосмической и энергетической промышленности, машиностроении и других областях.

Пассивная процедура ТК может быть применена только при наличии температурного градиента между объектом контроля и окружающей средой. Если температура объекта равна температуре окружающей среды, наступает тепловое равновесие, и обнаружение тепловых аномалий невозможно. Для активного ТК необходимо наличие дополнительного (искусственного) источника тепла, и аппаратура контроля становится более сложной. Следует заметить, что в пассивной ИК-термографии, например, Солнце может рассматриваться как дополнительный источник нагрева, мощность которого периодически изменяется во времени согласно суточному циклу.

При обнаружении инородных объектов на небольших глубинах схема контроля, показанная на рис. 1а, может быть сведена к упрощенной трехслойной модели (рис. 1б). Если, например, объект толщиной d_1 и диаметром W находится в почве на глубине d_0 , то поперечной диффузией тепла у краев объекта можно пренебречь. Тогда модель включает зоны 1, 2 и 3, как видно из рис. 1б.

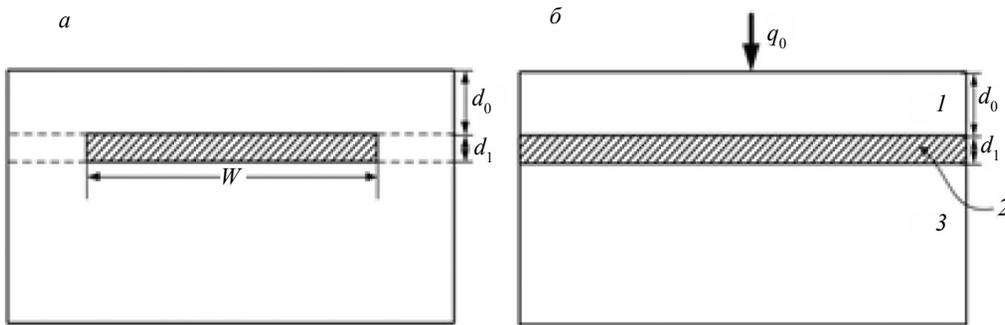


Рис. 1. Схема обнаружения дефекта: реальная (а); упрощенная (б).

Уравнение теплопроводности с соответствующими условиями имеет вид [11]:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_{11} \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \alpha_{11} \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \alpha_{12} \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \alpha_{21} \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \alpha_{21} \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \alpha_{22} \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = \alpha_{11} \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \alpha_{11} \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} + \alpha_{12} \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2}; \quad (3)$$

$$T_{1,z=d_0} = T_{2,z=d'_0}; \quad (4)$$

$$k_{12} \frac{\partial T_1}{\partial Z_{z=d_0}} = k_{22} \frac{\partial T_2}{\partial Z_{z=d'_0}}; \quad (5)$$

$$T_{1,z=d_0+d_1} = T_{2,z=d_0+d'_1}; \quad (6)$$

$$k_{12} \frac{\partial T_3}{\partial Z_{z=d_0+d_1}} = k_{22} \frac{\partial T_2}{\partial Z_{z=d_0+d'_1}}; \quad (7)$$

$$k_{12} \frac{\partial T_1}{\partial Z_{z=0}}(x_0, y_0, 0) = q_0, \quad (8)$$

где T — температура, °С, К; x , y , и z — нормализованные пространственные координаты; q_0 — солнечный поток на поверхности тела, Вт · м⁻²; $\alpha = k/(\rho c)$ — температуропроводность, м² · с⁻¹; k — теплопроводность, Вт · м⁻¹ · К⁻¹; ρ — плотность, кг · м⁻³; c — теплоемкость, Дж · кг⁻¹ · К⁻¹; индексы переменных соответствуют трем зонам в модели на рис. 1. В присутствии дефекта решение уравнений (1)—(8) для поверхностной температуры получают, используя преобразование Фурье—Ханкеля [11]:

$$\overline{T_1} \approx \frac{\overline{q}}{k_1 \eta_1 \sqrt{\frac{i\omega}{\alpha_{11}} + \xi^2}} \overline{G}(\xi, \omega) \overline{f}(\xi), \quad (9)$$

где ξ — пространственная частота в пространстве Ханкеля, связанная с радиусом $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; ω — временная частота в пространстве Фурье; $G(x, y)$ — температурный отклик дефекта, структура которого зависит от геометрии дефекта [8]. Здесь $f(x, y)$ — функция, описывающая геометрию дефекта в поперечном направлении (равна 1 в области дефекта и 0 в других точках):

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & (x, y) \in \Omega_{\text{defect}} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (10)$$

Наличие инородных тел в почве приводит к изменению ее средней плотности, теплоемкости и теплопроводности, в результате чего в процессе нестационарной теплопередачи возникают температурные аномалии в зоне неоднородности почвы. Анализ этих аномалий позволяет обнаружить скрытые инородные объекты и оценивать их параметры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные образцы

При разработке пассивного термографического контроля инородных тел в почве был использован метод управляющих переменных (control variable method), согласно которому наиболее критичные параметры сохранялись неизменными в ходе экспериментов. Твердые отходы с различной теплопроводностью имитировали, используя бытовые банки из полиэтилентерефталата (ПЭТ) и алюминия, заполненные парафином (теплопроводность 0,12 Вт · м⁻¹ · К⁻¹). Указанные предметы размещали в песок на различной глубине в условиях естественной солнечной радиации. Возможности метода ИК-термографии для обнаружения вышеуказанных имитаторов были исследованы наряду с определением оптимальных периодов временной регистрации температурных контрастов между скрытыми объектами и «бездефектными» зонами.

С целью исследовать влияние глубины залегания объектов на их термографические отметки в каждой группе экспериментов анализировали три образца, из которых один был размещен на поверхности песка, а два других — на глубинах 5 и 10 мм. Метод управляющих переменных использовали для поддержания одних и тех же условий солнечного облучения и влажности почвы при испытаниях всех типах объектов, заполненных парафином.

Алюминиевые объекты имели диаметр 10 см и высоту 5 см, ПЭТ-объекты — 10 и 7,5 см соответственно. Объекты размещали в боксе размерами 51×38×31 см, заполненном песком (см. рис. 2). В позиции № 1 объекты выходили на поверхности песка (нулевая глубина залегания). В позиции № 2 алюминиевые и ПЭТ-объекты размещали на глубине 5 мм и соответственно в позиции № 3 — на глубине 10 мм. Очевидно, что с ростом глубины тепловые отметки становились более расплывчатыми вследствие диффузии тепла в поперечном направлении. С целью избежать взаимного влияния объектов друг на друга объект № 3 размещали на большем расстоянии от менее заглубленных объектов.

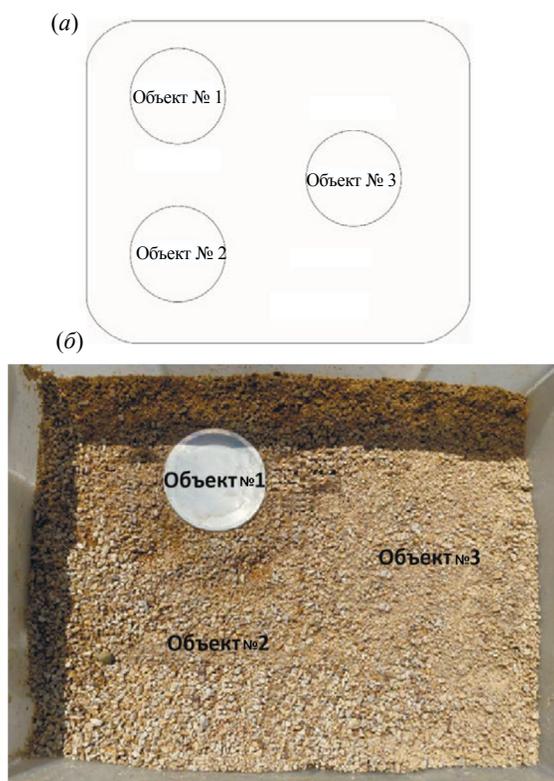


Рис. 2. Размещение инородных объектов в боксе с песком (объект № 1 выходит на поверхность, глубина объекта № 2—5 мм, глубина объекта № 3 — 10 мм).

Аппаратура

Эксперименты проводили сентябре в г. Чангша (провинция Хунань, Китай) при интенсивном солнечном излучении и длинном световом дне. Аппаратура контроля показана на рис. 3. Температуру и влажность песка определяли датчиком BRW100-2006, температурные распределения в боксе измеряли с интервалом 15 мин с помощью тепловизора MAG62 (спектральный диапазон 7—15 мкм, матричный ИК-детектор 640×480, максимальная частота записи термограмм 50 Гц).

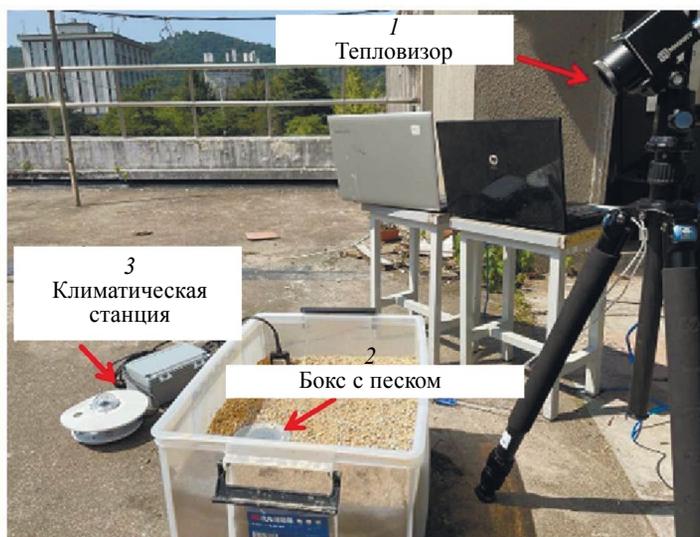


Рис. 3. Экспериментальная аппаратура (1—тепловизор; 2—бокс с песком; 3—климатическая станция).

Период солнечной иррадиации длился с 8:00 до 20:00. В течение дня мощность солнечного излучения измеряли каждые 15 мин с помощью портативной климатической станции YGY-TVQ. Тепловизор располагали на расстоянии 1,2 м от бокса с песком, что обеспечивало пространственное разрешение 0,8×0,8 мм. Датчик влажности и температуры был вставлен в песок вертикально на расстоянии 130 мм от объектов, интервал времени измерений также составлял 15 мин.

Всего провели 3 экспериментальные сессии. В первых двух сессиях объекты контроля из алюминия и ПЭТ последовательно размещали в песке на различных глубинах. Бокс выдерживали на открытом воздухе в течение двух дней перед началом измерений. Третья сессия включала два этапа экспериментов на ПЭТ-объекте при различной влажности песка (3 и 19 %). В последнем случае объекты выдерживали на открытом воздухе в течение двух дней, после чего в течение следующих двух дней выполняли измерения в период с 8:00 до 20:00.

Очевидно, что условия солнечной иррадиации не были идентичны в ходе экспериментов, но в долгосрочной перспективе можно принять, что они были близки в течение нескольких последовательных солнечных дней. Заметим, что такие же погодные условия имеют место, например, на Кипре, поэтому технология обнаружения инородных тел должна быть одной и той же для локаций, расположенных на одной и той же географической широте.

ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изменение эффективности обнаружения во времени

Термограммы поверхности песка над алюминиевыми и ПЭТ-объектами были записаны в течение различных периодов времени, связанных с длительностью солнечного облучения. Изменения средних температур поверхности песка над объектами из алюминия и в бездефектной зоне показаны на рис. 4 (всего последовательность включала 65 термограмм).

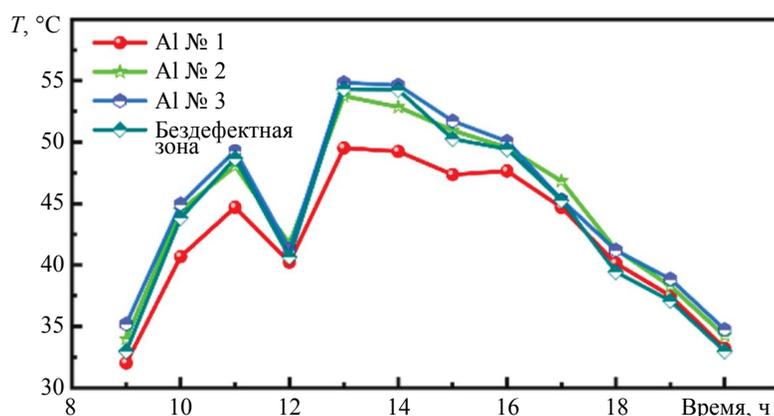


Рис. 4. Изменение температуры поверхности песка во времени (объекты из алюминия).

Сравнивая температурные профили, видно, что все три объекта из алюминия отчетливо выявляются на глубинах 0, 5 и 10 мм в течение всего периода наблюдения. Наилучшие условия обнаружения имеют место от 9:00 до 14:00, затем они ухудшаются от 15:00 до 18:00 и снова улучшаются в период от 19:00 до 20:00. Следует заметить, что алюминиевый объект на поверхности песка отчетливо виден на ИК-термограмме благодаря комбинированию температурных и излучательных эффектов.

Вторая серия экспериментов включала анализ объектов из ПЭТ. Результаты приведены на рис. 5 (65 термограмм).

Как и в случае алюминия, ПЭТ-объекты наблюдаются на поверхности песка в течение всего времени наблюдения благодаря изменению как температуры, так и коэффициента излучения. На глубине 5 мм такой объект невидим от 14:00 до 20:00, в то время как для объектов на глубине 10 мм температурный сигнал отсутствует от 16:00 до 20:00. Наилучший период наблюдения имеет место от 9:00 до 14:00, в то время как уже около 15:00 «видимость» ПЭТ-объекта ухудшается. Заметим, что с 16:00 до 20:00 тепловые отметки объектов были размытыми и не обеспечивали надежного обнаружения.

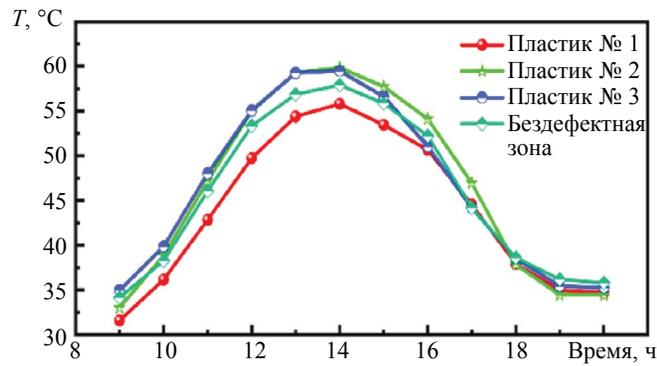


Рис. 5. Изменение температуры поверхности песка во времени (объекты из ПЭТ).

Следует заметить, что, когда объекты из алюминия были заменены ПЭТ-объектами, тепловой баланс всей системы нарушался, и для его восстановления требовалось 1-2 дня. Сравнение температурных распределений до и после достижения теплового баланса приведены на рис. 6.

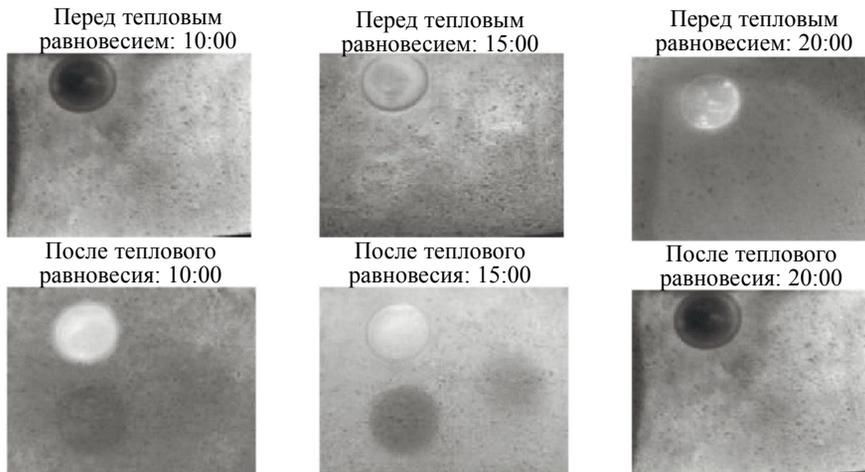


Рис. 6. Сравнение термограмм до и после теплового равновесия.

Рис. 7 представляет сравнение исходных термограмм и результатов обработки с использованием алгоритма RPHF [11] при обнаружении ПЭТ-объектов. На исходных термограммах

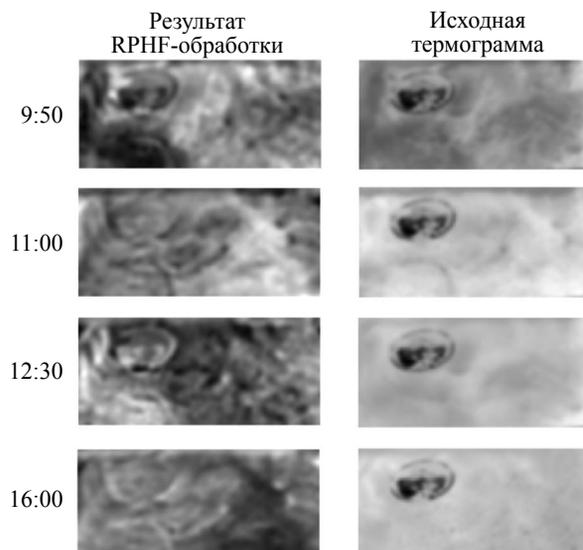


Рис. 7. Сравнение исходных термограмм и результатов обработки с помощью алгоритма RPHF (ПЭТ-объекты).

видны только поверхностные предметы в силу ранее указанных причин, тогда как отметки заглубленных объектов существенно смазаны. Обработка данных по методу RPHF улучшает температурные индикации скрытых дефектов, однако качество изображений остается низким.

Зависимость эффективности обнаружения от влажности почвы

С целью анализа влияния влажности почвы на характеристики обнаружения ПЭТ-объектов с 9:00 до 14:00 была выполнена 3-я сессия экспериментов на песке с влажностью 3 и 19 %. Изменения температуры характерных точек во времени показаны на рис. 8.

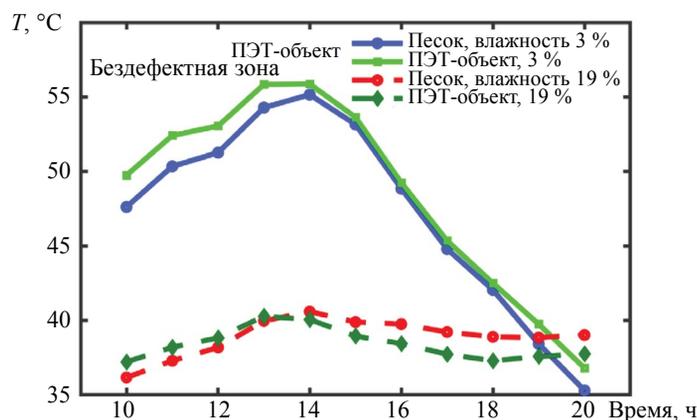


Рис. 8. Изменение температуры поверхности во времени при обнаружении ПЭТ-объектов на глубине 10 см при различной влажности песка.

На поверхности сухого и низкой влажности песка температура в результате солнечного нагрева достигала почти 55 °C, что сравнимо с условиями пустыни. При этом профили изменения температуры, а также солнечной радиации, была близки к косинусоидальному. На поверхности песка с влажностью 19 % температура достигала 40 °C. Разница температур между дефектными и бездефектными участками становилась заметной рано утром, затем снижалась и вновь становилась заметной после 20:00. При высокой влажности песка (см. рис. 8) дифференциальные температурные сигналы были сравнительно низкими рано утром (до 10:00) и достигали регистрируемого уровня после 16:00.

Рис. 9 показывает температурные отпечатки над объектами в песке с различной влажностью в течение дневного цикла. При низкой влажности песка (3 %) инородные объекты ранним

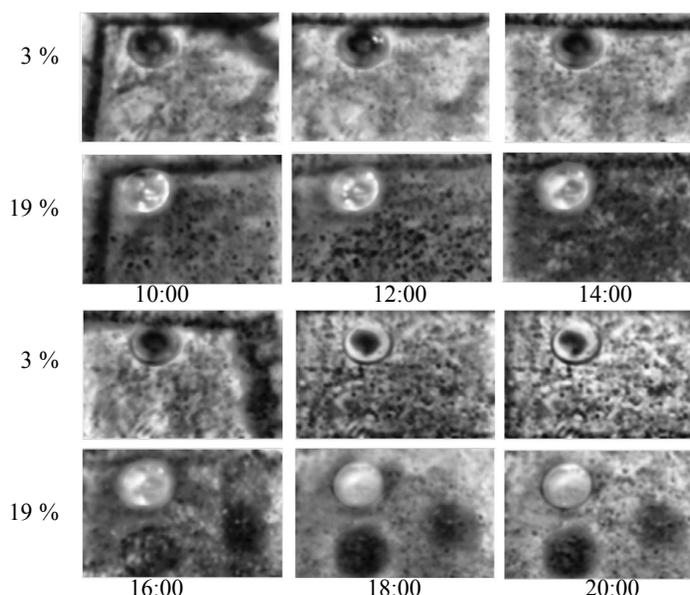


Рис. 9. Термограммы инородных ПЭТ-объектов в песке с различной влажностью.

утром характеризуются слабым контрастом, причем этот контраст уменьшается с ростом солнечной иррадиации. Аналогичным образом эффективность обнаружения объектов снижается после захода солнца. Во влажной почве (19 %) объекты обнаруживаются после 16:00, когда солнечная иррадиация начинает снижаться. Указанные феномены обусловлены тем, что влажность изменяет теплофизические характеристики почвы, что приводит к различному поведению дифференциальных температурных сигналов во времени. Фактически исследование динамики температуры почвы может также служить инструментом оценки влажности почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от ряда предыдущих работ по обнаружению инородных предметов в почве с помощью микроволнового излучения в настоящем исследовании продемонстрированы возможности тепловидения, используя солнечную иррадиацию для нагрева поверхности почвы. Показано, что основным фактором эффективности контроля является правильный выбор периода наблюдения в течение цикла день/ночь. Установлено, что инородные объекты (как металлические, так и неметаллические) могут быть обнаружены на глубине до 10 мм. Другим важным фактором эффективности обнаружения является контраст теплофизических свойств объекта и почвы, в частности, различия в теплопроводности и теплоемкости. В случае объектов на глубинах до 10 мм оптимальным является период наблюдения от 9:00 до 14:00. Эффективность обнаружения улучшается с повышением влажности почвы вследствие роста ее теплопроводности. На влажность почвы влияют дождевые осадки, а также возможно ее искусственное увеличение путем ирригации. Будущие исследования будут направлены на анализ возможности обнаружения инородных объектов в почве на глубинах более 10 мм в сложных погодных условиях. Обработку последовательности исходных ИК-термограмм целесообразно производить с использованием алгоритма восстановления теплового псевдопотока, который позволяет снизить влияние поверхностных помех и тепловой диффузии в поперечных направлениях.

Настоящее исследование финансировалось Отделом образования провинции Хунань, Китай, по контракту № 22A0517, Фондом естественных наук провинции Хунань по гранту № 2023JJ30166, а также частично Национальным молодежным фондом естественных наук по гранту № 61901167.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Li C., Hu X., Zhong C., Zeng, Shen H.* Solid waste detection in cities using remote sensing imagery based on a location-guided key point network with multiple enhancements // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2023. V. 16. P. 191—201.
2. *Nishar A., Richards S., Breen D., Robertson J., Breen B.* Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei — Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand // *Renewable Energy*. 2016. V. 86. P. 1256—1264. DOI: 10.1139/juvs-2015-0030
3. *ElMasry G., ElGamal R., Mandour N., Gou P., Al-Rejaie S., Etienne B., Rousseau D.* Emerging thermal imaging techniques for seed quality evaluation: Principles and applications // *Food Research International*. 2020. V. 131. P. 109025. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109025
4. *Kalogirou S.A., Florides G.A.* Measurements of ground temperature at various depths / *Proc. 3rd International Conference on Sustainable Energy Technologies*. 2004. Nottingham, U.K. P. 1—6.
5. *Jinmin Dai, Zijun Wang.* Infrared thermography non-destructive testing technology and its applications // *Techniques of Automation and Applications*. 2007. V. 26 (1). P. 10—16.
6. *Deans J., Schmithals G., Carter L.J.* An analysis of a thermal imaging method for landmine detection using microwave heating // *J. Appl. Geophys.* 2001. V. 47 (2). P. 123—133. DOI: 10.1016/S0926-9851(01)00052-0
7. *Yali Wang.* The invention relates to an imaging performance deduction method for infrared detection // *China Science and Technology Information*. 2024. No. 6. P. 121—124.
8. *Pracht M., Świdorski W.* Analysis of the possibility of non-destructive testing to detect defects in multi-layered composites reinforced fibers by optical IR thermography // *Composite Structures*. 2019. V. 213. P. 204—208.
9. *Mix P.E.* Introduction to nondestructive testing: a training guide. John Wiley & Sons. June 2005.
10. *Loganathan T.M., Sultan M.T.H., Muhammad Amir S.M., Jamil J., Yusof M.R., Md Shakh A.U.* Infrared thermographic and ultrasonic inspection of randomly-oriented short-natural fiber-reinforced polymeric composites // *Frontiers in Materials*. 2021. No. 7. P. 604459.
11. *Hongjin Wang, Sheng-Jen Hsieh, Xunfei Zhou, Bo Peng.* Restored pseudo heat flux (RPHF) algorithm for carbon fibre composite defect detection using thermography under uneven heating // *Quantit. InfraRed Thermogr. J.* Dec. 2017. V. 15 (4). P. 1—15. DOI: 10.1080/17686733.2017.1417807

12. Wang H., Wang N., He Z., He Y. Phase-locked restored pseudo heat flux thermography for detecting delamination inside carbon fiber reinforced composites // IEEE Trans. Ind. Informat. May 2018. V. 15. No. 5. P. 2938—2946.
13. He Z., Wang H., Li Y., Zhang Z., Zhang Y., Bi H., He Y. A deconvolutional reconstruction method based on Lucy–Richardson algorithm for joint scanning laser thermography // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. V. 70. P. 1—8.
14. Hongjin Wang, Yuejun Hou, Yunze He, Can Wen. A Physical-constrained decomposition method of infrared thermography: Pseudo restored heat flux approach based on Ensemble Bayesian Variance Tensor Fraction // In IEEE Transactions on Industrial Informatics. March 2024. V. 20. No. 3. P. 3413—3424. DOI: 10.1109/TII.2023.3293863
15. Yunze He, Xinying Mu, Jiarong Wu, Yue Ma, Ruizhen Yang, Hong Zhang, Pan Wang, Hongjin Wang, Yaonan Wang. Intelligent detection algorithm based on 2D/3D-UNet for internal defects of carbon fiber composites // Nondestructive Testing and Evaluation. 2024. V. 39 (4). P. 923—938. DOI: 10.1080/10589759.2023.2234548
16. Hongjin Wang, Hsieh S.J. Solving the inverse heat conduction problem in using long square pulse thermography to estimate coating thickness by using svr models based on restored pseudo heat flux (rphf) in-plane profile // J. Nondestr. Eval. 2018. V. 37 (4).
17. Strag M., Świdorski W. Non-destructive inspection of military-designated composite materials with the use of Terahertz imaging // Composite Structures. 2023. V. 306. P. 116588.
18. Nüßler D., Jonuscheit J. Terahertz based non-destructive testing (NDT). Making the invisible visible // tm-Technisches Messen. 2021. V. 88 (4). P. 199—210. DOI: <https://doi.org/10.1515/teme-2019-0100>
19. Vavilov V.P., Burleigh D.D., Demin V.G. Advanced modeling of thermal NDT problems: from buried landmines to defects in composites / Proc. SPIE “Thermosense XXIV”. V. 4710. P. 507—521.
20. Vavilov V.P., Burleigh D. Infrared Thermography and Thermal Nondesrtuctive Testing. Switzerland: Springer Nature, 2020. 595 p.
21. Florides G., Kalogirou S. Annual ground temperature measurements at various depths, Environm. Science. Physics. 2005. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:92914544>
22. Prgowski P., Świdorski W., Walczak R.T., Lamorski K. Buried mine and soil temperature prediction by numerical mode / Proc. SPIE. Aug. 2000. V. 4038. P. 1—6. DOI: 10.1117/12.396227
23. Yan Duan, Hua Jin, Qiang Zhen. Testing study on moisture content effect on thermal conductivity for clay and sand // Yellow river. 2016. V. 38 (02). P. 114—120 (in Chinese).
24. Guozeng Liu, Weicheng Gao, Wei Liu, Xionghui Zou, Jiangxun Xu, Tao Liu. Debonds and water-filled defects detection in honeycomb sandwich composites based on pulse infrared thermography NDT technique // Rus. J. Nondestr. Test. 2023. V. 59. P. 583—591. DOI: 10.1134/s1061830923600089
25. Zorin A.E., Krasnenkov V.I. Diagnostic Microlab-Z2 complex for nondestructive evaluation of structural and deformation parameters of metal constructions // Rus. J. Nondestr. Test. 2024. V. 60. P. 75—84. DOI: 10.1134/S1061830923601447.
26. Rongxin Sun, Cong Liu, Wei Li, Feng Yang, Peng Jiang. Characterization of crack damages in composite materials by using frequency- and time-domain analysis // Rus. J. Nondestr. Test. 2024. V. 60. P. 22—34. <https://doi.org/10.1134/s1061830923600582>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХЭЛЕМЕНТНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ТИПА С АКТИВНЫМ ЭКРАНИРОВАНИЕМ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

© 2024 г. А.Е. Горбунов^{1,2,*}, П.В. Соломенчук^{2,**}, А.С. Уманский^{1,***}

¹Санкт-Петербургский горный университет,
Россия 199106 Санкт-Петербург, 21 линия В.О., 2
²ООО «Константа», Россия 198098 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21
E-mail: *ae.gorbunov.w@gmail.com; **pavel257@mail.ru;
***umanskiy_as@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию 21.05.2024; после доработки 18.07.2024
Принята к публикации 19.07.2024

Работа посвящена вопросам построения конечно-элементной модели вихретокового преобразователя, предназначенного для контроля степени пропаянности нахлесточных паяных соединений токопроводящих шин. Разработана методика построения конечно-элементной модели, включающая в себя геометрический параметр, изменение которого приводит к перестроению сетки конечных элементов, но не влияющего на контролируемые параметры неразрушающего контроля, что позволяет провести серию измерений значения сигнала конечно-элементной модели вихретокового преобразователя с последующим усреднением, благодаря чему обеспечивается приемлемая точность. Результаты испытаний подтверждают работоспособность вихретокового преобразователя, диапазон измерения размера дефекта паяного соединения от 0 до 100 % и обеспечение заявленной основной абсолютной погрешности измерения степени пропаянности 5 %.

Ключевые слова: вихретоковый контроль, паяные соединения, тангенциальный преобразователь, конечно-элементное моделирование.

MODELING OF TWO-ELEMENT TANGENTIAL EDDY CURRENT PROBE WITH ACTIVE SHIELDING FOR SOLDERED JOINTS INSPECTION

© 2024 A.E. Gorbunov^{1,2,*}, P.V. Solomenchuk^{2,**}, A.S. Umanskiy^{1,***}

¹Saint Petersburg Mining University, Russia 199106 St. Petersburg, 21st Line, 2
²Constania Ltd., Russia 198095 St. Petersburg, Ogorodnii per., 21
E-mail: *ae.gorbunov.w@gmail.com; **pavel257@mail.ru;
***umanskiy_as@pers.spmi.ru

The paper is devoted to designing a finite-element model of the eddy current probe for testing the degree of soldering of lap soldered joints of conductive busbars. The method for finite-element model designing is developed, which parameters provide calculations error of signals of finite-element model of eddy current probe below 1.5%. The test results confirm the performance of the eddy current probe, the measurement range for soldered joints defect size from 0 to 100 % and provision of the declared basic absolute error of the degree of soldering measurement of 5 %.

Keywords: eddy current testing, soldered joints, tangential probe, finite-element modeling.

DOI: 10.31857/S0130308224080042

ВВЕДЕНИЕ

При создании специализированного вихретокового преобразователя (ВТП) для решения узких задач в условиях влияния множества мешающих параметров много ресурсов уходит на создание макетов ВТП, что усложняется отсутствием возможности провести необходимые испытания в лабораторных условиях. Оптимальное решение — разработка и верификация виртуальной модели ВТП и с применением опытного образца ВТП для подтверждения характеристик модели. Статья посвящена вопросам построения виртуальной модели и обеспечению точности расчета сигналов модели ВТП. В статье рассматривается процесс создания двухэлементного ВТП тангенциального типа с активным экранированием, предназначенного для контроля нахлесточных паяных соединений обмоток статора электрических машин (рис. 1).

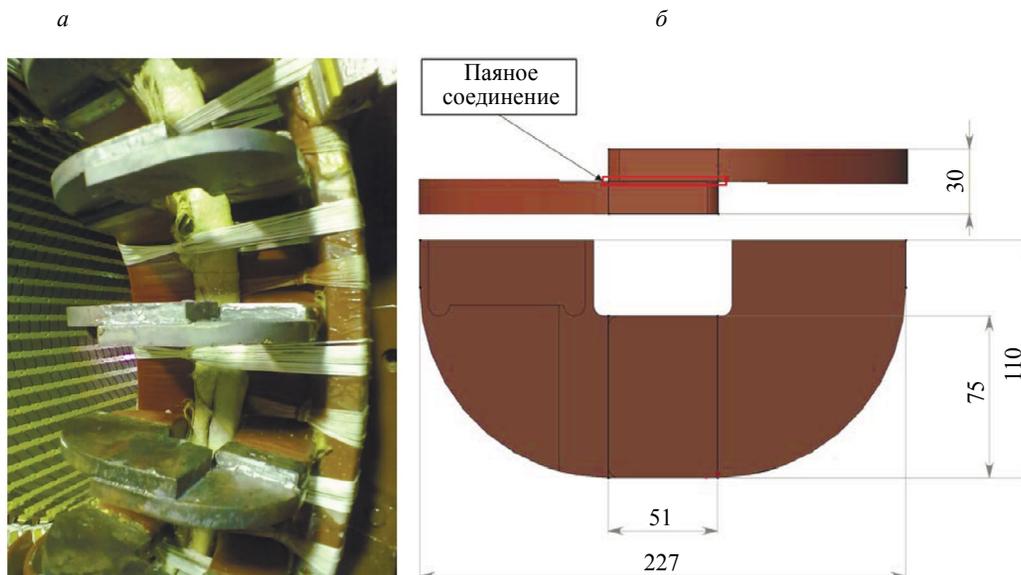


Рис. 1. Паяные соединения медных шин: фотография (а); эскиз (б).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Для расчета параметров ВТП применяются несколько основных методов: аналитический расчет по формулам на основе справочной литературы, моделирование методом конечных разностей (МКР) и методом конечных элементов (МКЭ). Аналитический расчет взаимодействия ВТП с объектом контроля (ОК) дает достаточно точные результаты [1, 2], однако не позволяет учитывать экранирование, анизотропию материалов и прочие особенности [3]. Более точные результаты расчета достигаются с применением МКР и МКЭ, которые представляют элементы модели в виде множества точек («узлов»), объединенных в сетку. В МКР результаты расчета определяются только в узлах такой сетки, в то время как при использовании МКЭ значения вычисляются в каждой точке расчетной области [4]. Следовательно, МКР требует меньше временных и вычислительных ресурсов, но обеспечивает высокую точность значений только в узлах сетки с грубой аппроксимацией в промежуточных точках, а в МКЭ благодаря интегрированию по объему конечного элемента (КЭ) обеспечивается высокая точность ценой высоких затрат вычислительных мощностей.

Существует множество программных комплексов для решения задач моделирования электромагнитных полей при помощи МКЭ. Среди них наиболее популярны программы ANSYS Maxwell, Altair Flux, COMSOL Multiphysics, JMAG, SIMULIA Abaqus. В данной работе использовалась программа Ansys Maxwell, предоставляющая широкий спектр возможностей для работы и оптимизации сетки КЭ.

КЭ-модель ВТП для контроля паяного соединения

На первых этапах создания модели взаимодействия ВТП и ОК с применением МКЭ при построении трехмерной модели элементов (рис. 2) и принципиальной электрической схемы (рис. 3) изучаемые параметры модели задаются как переменные для дальнейшего поиска оптимального значения или исследования его влияния на сигнал ВТП.

Анализируемый ВТП состоит из двух элементов, расположенных по разные стороны от ОК симметрично относительно плоскости паяного соединения. Каждый из элементов включает в себя четыре основных обмотки: возбуждения, измерительную, экранирующую и компенсационную. Подробное описание конструкции ВТП, принципа его работы, особенностей ОК приведено в [5—7].

ОК — пластины из электротехнической меди, соединенные внахлестку серебрено-оловянным припоем, обеспечивающим электрический контакт. Контролируемая зона — площадь сопряжения пластин, контролируемый параметр — степень пропаянности соединения, выраженная как отношение текущей площади электрического контакта пластин к площади сопряжения пластин. Имитатор дефекта — непропай в контролируемой зоне. Непропай одинаковой площади в разных участках контролируемой зоны по-разному влияет на сигналы ВТП. Для

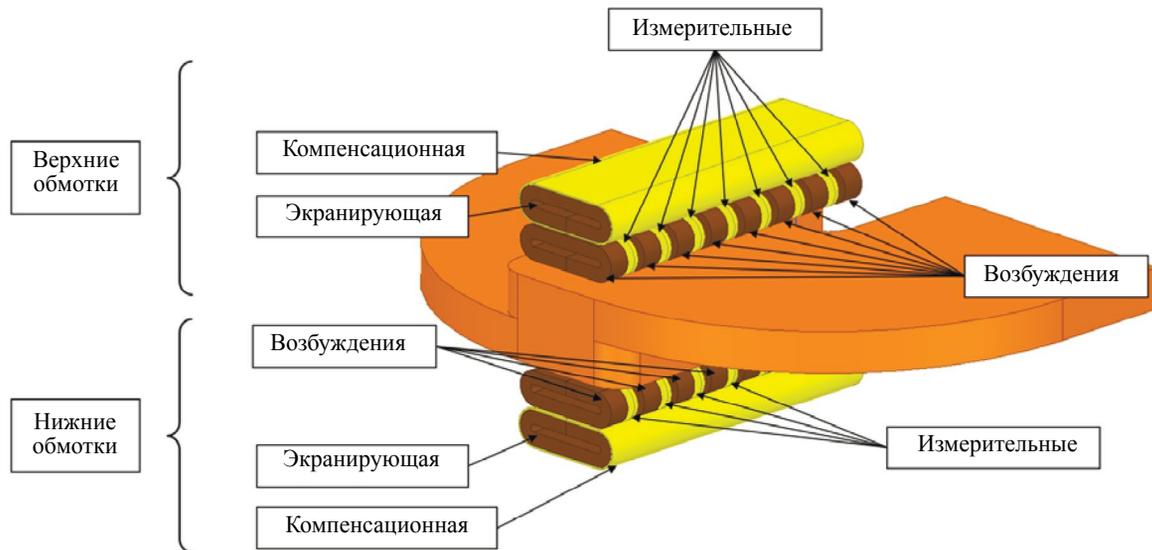


Рис. 2. катушки ВТП и ОК крупным планом.

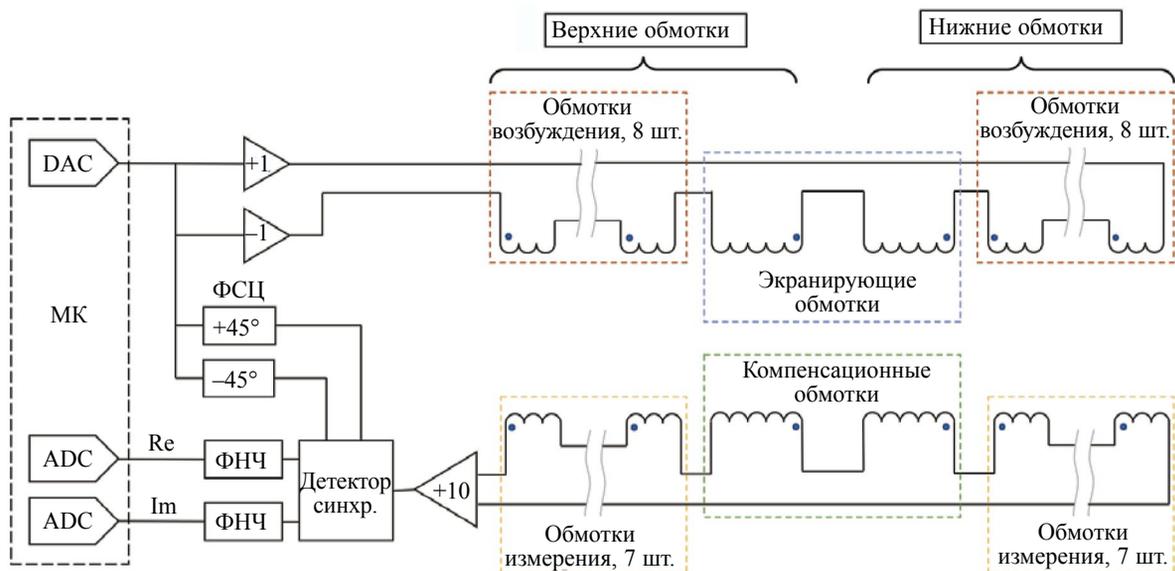


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная КЭ-модели ВТП.

моделирования непролая его модель задана в виде двух областей: вдоль боковой стенки (вдоль оси X) и вдоль торца соединения (вдоль оси Y) (рис. 4), а их размеры выражены в процентах от площади паяного соединения.

При вихретоковом контроле на результаты измерения оказывает влияние ряд мешающих параметров:

1. Параметры взаимного расположения ВТП и ОК [8, 9].
2. Геометрические параметры ОК (форма и размеры) [10, 11].
3. Электрические параметры ОК (удельная электрическая проводимость) [12, 13].
4. Условия контроля (сильные магнитные поля или близкорасположенные электропроводящие объекты).

В КЭ модели «ВТП—ОК» исследуются следующие мешающие параметры, заданные переменными:

1. Взаимное расположение и перемещение ВТП и ОК по осям X , Y , Z .
2. Расстояние до соседних паяных соединений.
3. Разброс значений удельной электрической проводимости материала ОК.

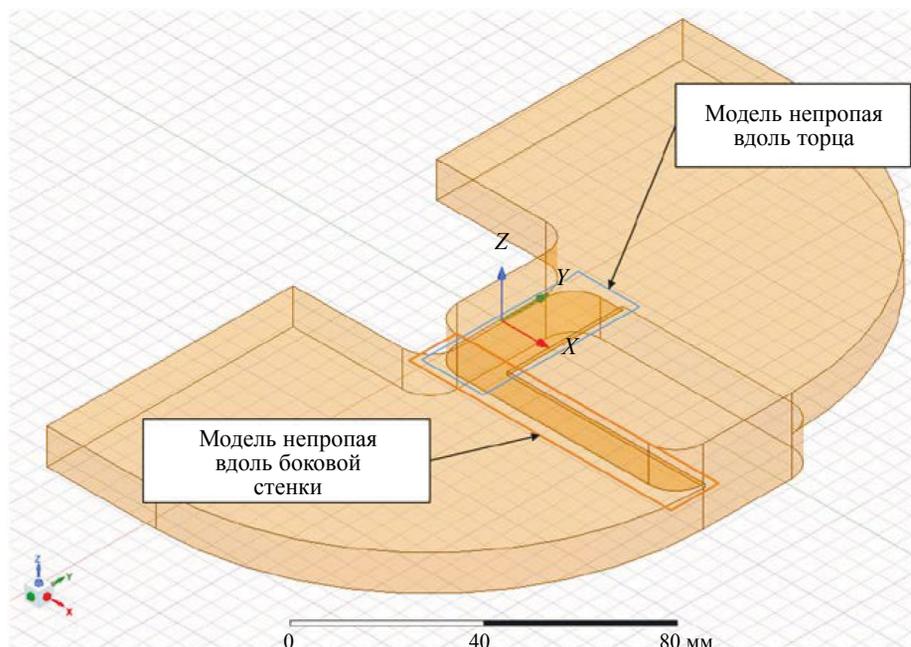


Рис. 4. Модели имитаторов дефектов.

Сигналом ВТП является напряжение U на катушках измерительной обмотки ВТП, информативным параметром является его амплитуда. Измеряемой величиной является степень пропаянности ОК, выраженная в %.

Точность моделирования

Ansys Maxwell задействует технологию адаптивного построения сетки конечных элементов, локально меняя плотность сетки модели на основе данных о градиенте анализируемых полей до достижения задаваемого уровня погрешности энергии или числа адаптивных вычислений модели [15].

Разброс результатов моделирования при изменении сетки КЭ при неизменных входных параметрах анализируется путем создания в удаленном участке ОК выреза (рис. 5), влияние которого на процесс измерения пренебрежимо мало [16]. Изменение положения выреза приводит к перестроению сетки КЭ при сохранении прочих параметров. В результате получен график зависимости сигнала ВТП от положения выреза в модели (рис. 6), физический смысл которого заключается в разбросе значений результатов измерений КЭ-модели ВТП, определяемом перестроением сетки КЭ, и который характеризует прецизионность КЭ-модели. В идеальной КЭ-модели ВТП график должен практически совпадать с прямой линией.

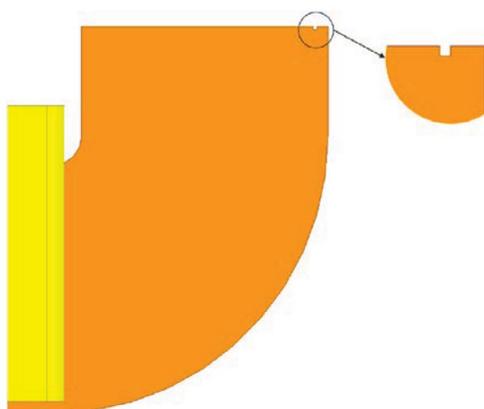


Рис. 5. Вырез в модели.

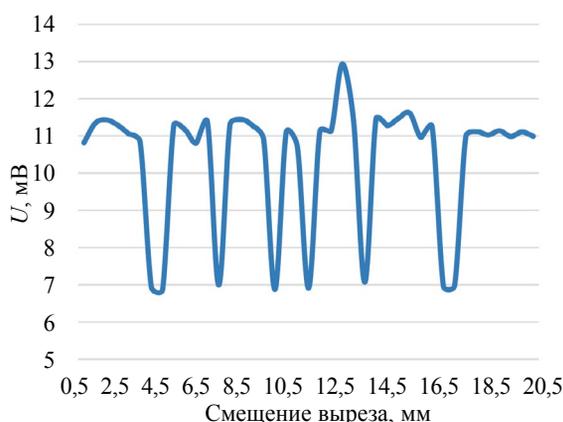


Рис. 6. Зависимость сигнала ВТП от положения выреза в модели.

На прецизионность КЭ-модели ВТП оказывают влияние следующие параметры сетки КЭ:

1. Выбор генератора сетки: классическая или тау. Отличия генераторов в том, что классический генератор начинает с создания грубой сетки с последующим ее уточнением, а тау-генератор, наоборот, от очень точной сетки переходит к более грубой с большими базовыми элементами. Классический генератор лучше справляется с построением сетки больших, но тонких объектов, в то время как тау-генератор больше всего подходит для построения сетки на объектах со значительными искривлениями геометрии [17].

2. Выбор количества адаптивных вычислений модели, нацеленный на повышение точности результатов измерения модели. Однако увеличение проходов алгоритма не всегда повышает прецизионность сигналов модели [18].

3. Ограничение длины КЭ, при котором можно задать предельный размер базового элемента, принудительно увеличивая плотность сетки КЭ.

4. Разделение ОК на составные части. В рассматриваемой модели ОК делится на три участка — контролируемая зона и два «хвоста», в каждой из которых параметры сетки могут быть настроены по-разному.

5. Построение сетки вручную путем создания плоских или объемных фигур, вершины которых являются узлами сетки.

6. Усреднение по 10 значениям, когда один сигнал модели считается как среднее арифметическое из 10 решений модели.

Применив вышеописанные операции на модели, были получены сигналы и статистика решений, анализ которых позволяет выбрать оптимальные настройки и параметры для дальнейшей работы с моделью ВТП. Основываясь на полученных сигналах и эмпирических данных, примем, что диапазон амплитуды сигнала ВТП при измерении степени пропаянности ОК составляет порядка 3 мВ, поэтому размах сигнала модели ВТП, должен быть не более 0,5 % от этого значения. Тип распределения значений каждого моделирования определяется на основе метода графиков QQ и метода омега-квадрат [19].

Таким образом, поставленным критериям точности соответствует только одна модель с применением следующих параметров:

1. Генератор КЭ-сетки типа «тау».
2. Три прохода адаптивного вычисления КЭ-сетки.
3. Усреднение результатов измерения модели ВТП по 10 значениям.

Увеличение требуемого числа решений в 10 раз приводит к увеличению временных затрат, однако каждое из решений требует относительно небольшое количество вычислительных ресурсов, конкретно в нашем случае КЭ-модель состояла из почти 132 тысяч тетраэдров, а одно ее решение производилось за 5 мин 14 с и использовало 2,3 ГБ оперативной памяти, что позволило моделировать несколько решений параллельно и достичь уровня прецизионности в 5 %. Показателем качества проведенной отладки КЭ-модели служит сравнение сигналов ВТП от дефектов до и после отладки, представленное на рис. 7, на котором видно существенное повышение прецизионности.

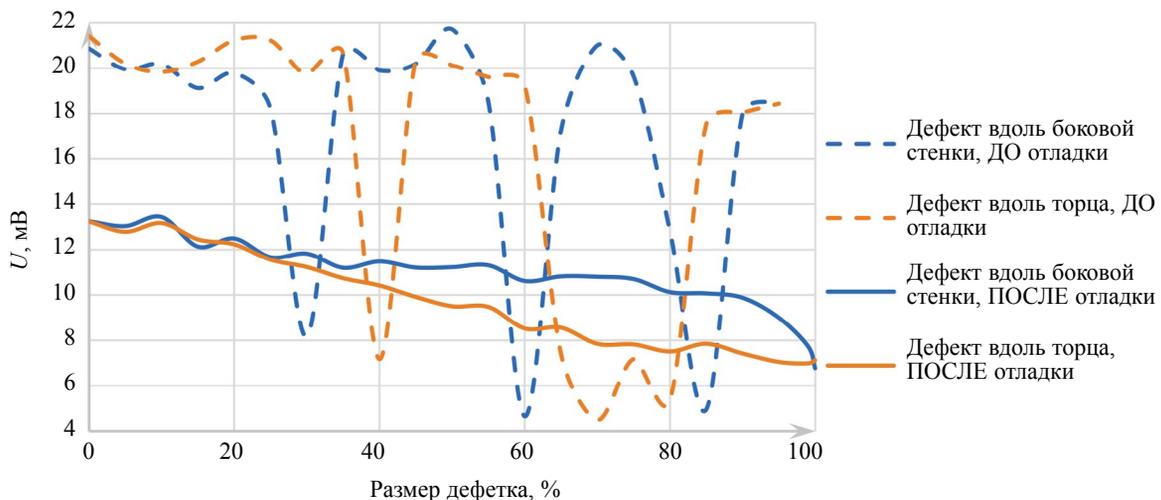


Рис. 7. Сравнение сигналов модели от двух типов непряпая до и после отладки.

Качественная КЭ-модель позволяет изучить влияние контролируемого и мешающих параметров на сигналы ВТП для дальнейшей оптимизации конструкции. Для этого были получены сигналы при изменении следующих параметров:

1. Контролируемых параметров:
 - 1.1. Размер дефекта, расположенного вдоль боковой стенки ОК.
 - 1.2. Размера дефекта, расположенного вдоль торца ОК.
2. Мешающих параметров:
 - 2.1. Смещения ВТП относительно ОК по осям X , Y , Z .
 - 2.2. Изменение удельной электропроводности материала ОК.
 - 2.3. Изменение расстояния между соседними ОК.

В результате получены годографы сигналов ВТП, описывающие влияние этих параметров (рис. 8).

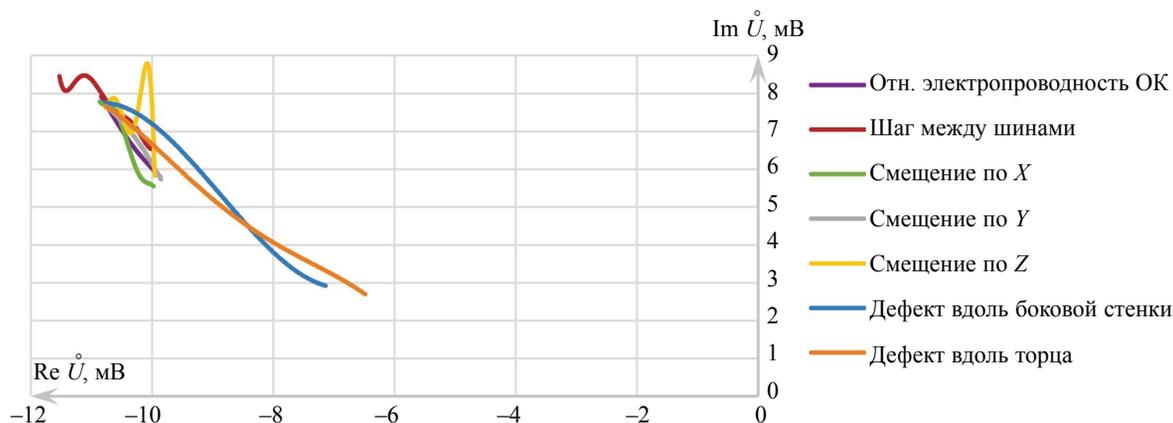


Рис. 8. Годографы дефектов и мешающих параметров.

На данном этапе важно оценить влияние мешающих параметров, связанных с расположением ВТП относительно ОК в пространстве. Поскольку информативным параметром рассматриваемого ВТП является амплитуда его сигнала, то комплексный сигнал мешающих параметров положения ВТП дополнительно пересчитан в значение амплитуды сигнала модели ВТП, график зависимостей которых представлен на рис. 9. По полученным графикам можно судить о значительном и нелинейном влиянии этих параметров на сигнал ВТП, в отличие от влияния удельной электропроводности ОК на сигнал. При этом влияние технологического разброса толщины деталей паяного соединения соизмеримо с оценкой погрешности КЭ-модели, в связи с чем объективная оценка его влияния затруднена. Благодаря полученным данным было выявлено,

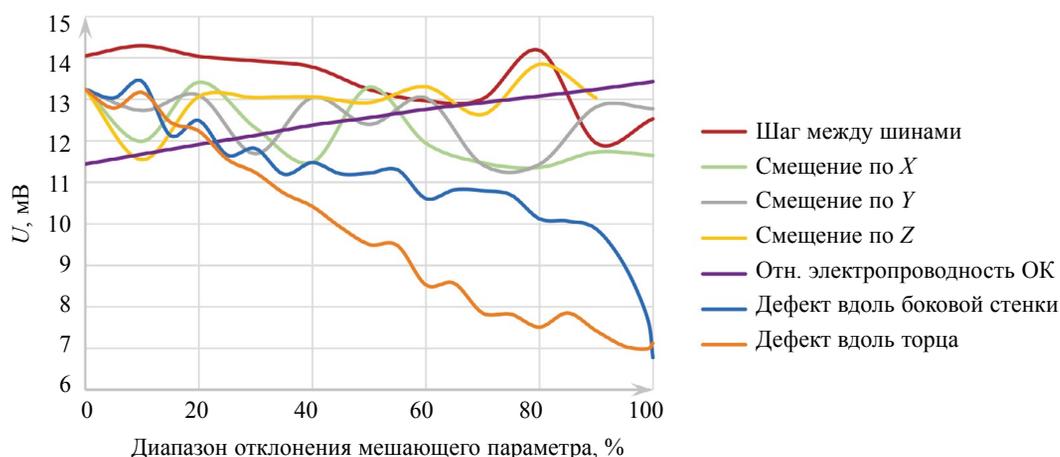


Рис. 9. Влияние контролируемых и мешающих параметров на амплитуду сигнала ВТП, где диапазоны отклонения мешающих параметров: шаг между шинами — от 70 до 90 мм; смещение по X — от 0 до 10 мм; смещение по Y — от 0 до 10 мм; смещение по Z — от 0 до 3 мм; относительная электропроводность ОК — от 40 до 60 МСм/м.

что для эффективного подавления мешающих параметров взаимного расположения ВТП и ОК требуются средства фиксации положения катушек ВТП относительно контролируемого соединения, что было достигнуто при доработке и оптимизации конструкции.

В свою очередь на основе данных модели о влиянии удельной электропроводности ОК на сигналы ВТП была разработана методика подавления влияния изменения удельной электропроводности компонентов ОК и контрольных образцов на результаты измерения степени пропаянности паяных соединений.

ИСПЫТАНИЕ МАКЕТА ВТП

По результатам проведенного моделирования ВТП была изготовлена оснастка для обработки технологии намотки провода, балансировки обмоток ВТП, а также оценки влияния некоторых мешающих параметров. Для проведения испытаний, настройки и проверки работоспособности ВТП при его дальнейшей эксплуатации были изготовлены настроечные образцы (НО) пропаянности 100 и 0 %. Образец 100 % представляет собой монолитную медную деталь, повторяющую по форме и размерам контролируемое соединение, образец 0 % представляет собой две монолитные детали, повторяющие по форме и размерам половинки контролируемого соединения, склеенные между собой через стеклотекстолитовую прокладку эпоксидным клеем. Дополнительно изготовлен промежуточный образец 60 % из заготовки образца 100 % с прорезью толщиной 1 мм на глубину 28,8 мм по всей ширине зоны контроля, имитирующей дефект вдоль боковой стенки площадью 40 %. В результате испытаний с применением оснастки получены годографы (рис. 10).

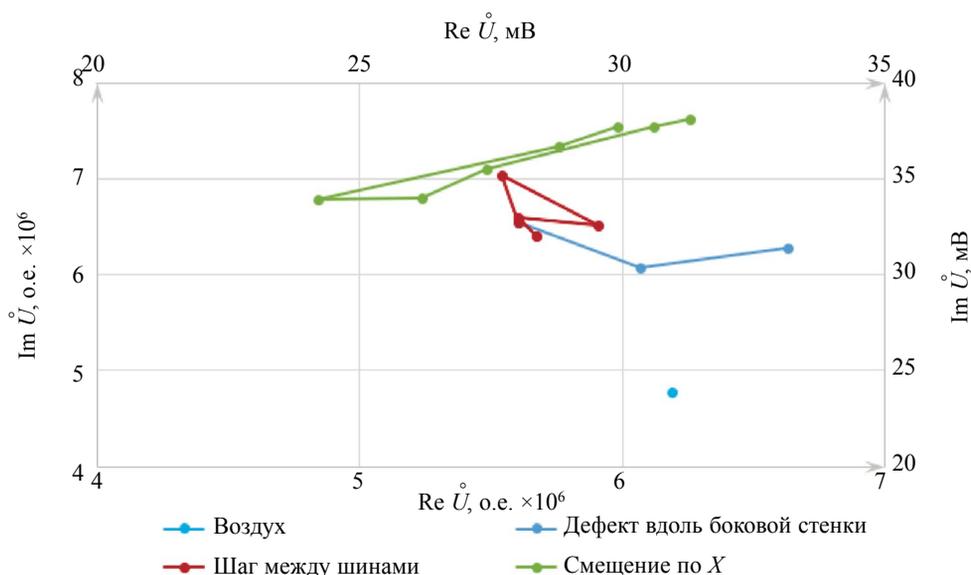


Рис. 10. Результаты испытаний с применением оснастки для балансировки.

Из рис. 10 видно, что характер сигналов ВТП в целом соответствует сигналам модели ВТП, подтверждена чувствительность ВТП к искомым дефектам, а также уточнено влияние мешающих параметров. На основании этих данных был проведен расчет геометрии и требуемой жесткости элементов конструкции ВТП для фиксации относительно ОК, общий вид конструкции готового ВТП представлен на рис. 11.

ВТП состоит из основания, к которому прикреплена рукоятка, содержащая плату с электронными компонентами. На основании неподвижно закреплена неподвижная и подвижная планка, в каждой из которых установлены катушки. Подвижная планка фиксируется с помощью зажима и безлюфтового соединения. Перемещение планки достаточно для того, чтобы компенсировать с требуемым запасом отклонение толщины паяного соединения во всем допуском диапазоне. На неподвижной планке расположен упор, фиксируемый на планке зажимом, предназначенный для позиционирования ВТП относительно паяного соединения. Этот упор позволяет обеспечить постоянство относительного расположения ВТП относительно контрольного образца во время настройки и относительно паяного соединения во время проведения контроля.



Рис. 11. Внешний вид ВТП.

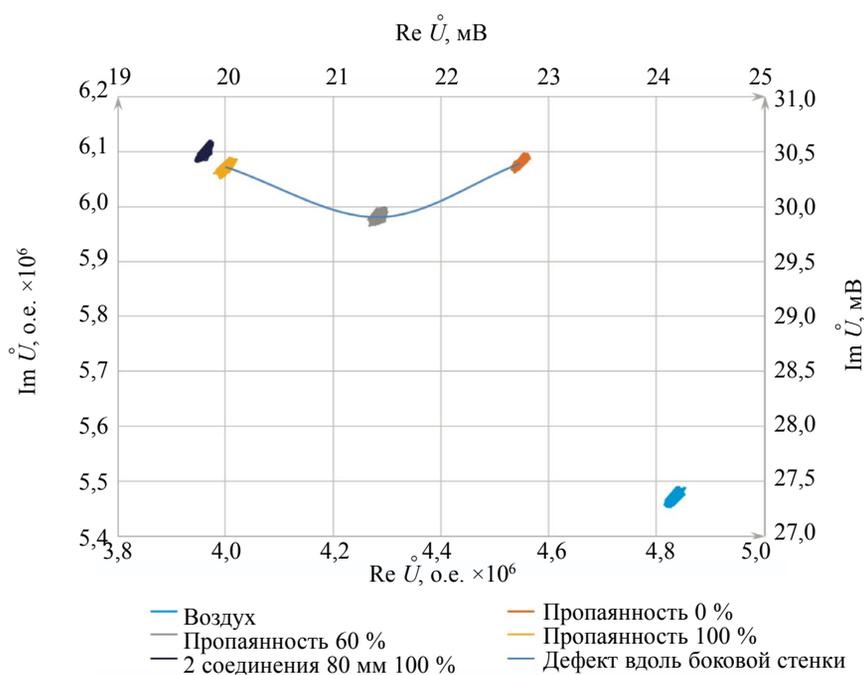


Рис. 12. Результаты испытаний ВТП.

На каждом НО проведены многократные измерения, результаты которых (рис. 12) демонстрируют соотношение сигнал/шум на уровне 14,7 и позволяют оценить прецизионность измерений.

Результаты испытаний подтверждают работоспособность ВТП, диапазон измерения размера дефекта паяного соединения от 0 до 100 % и обеспечение заявленной основной абсолютной погрешности измерения степени пропаянности 5 %.

ВЫВОДЫ

1. Разработана конечно-элементная модель «ВТП—ОК», точностные параметры которой позволяют провести изучение влияния контролируемого и мешающих параметров на сигналы ВТП для контроля нахлесточных паяных соединений токоведущих шин обмотки генераторов.

2. Предложена методика построения конечно-элементной модели и оптимизации параметров, которая может быть использована при разработке низкочастотных вихретоковых преобразователей различной конструкции. Также она может быть применена при изучении влияния мешающих параметров, встречающиеся на практике, которые невозможно достоверно воспроизвести в реальном объекте контроля или контрольных образцах.

3. На основе разработанной модели создан ВТП для контроля нахлесточных паяных соединений, с его помощью подтверждена сходимость результатов измерений конечно-элементной модели ВТП и реального ВТП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сясько В.А., Чертов Д.Н. Выявление расслоений углепластиковых материалов с использованием тангенциальных вихретоковых преобразователей // В мире неразрушающего контроля. 2012. № 2. С. 19—21. EDN: RUOHOR.

2. Сучков Г.М., Хомяк Ю.В. Повышение возможностей вихретокового контроля поверхности непрерывно-литых слябов из ферромагнитных сталей // Дефектоскопия. 2013. № 1. С. 78—83. EDN: OSSUAC.

3. Syasko V.A., Chertov D.N., Ivkin A.E. Measuring the thicknesses of the walls of carbon composite materials using the eddy-current phase method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2011. V. 47. P. 561—567. doi.org/10.1134/S1061830911080109

4. Потапов А.И., Сясько В.А., Коротеев М.Ю., Соломенчук П.В. Конечно-элементное моделирование преобразователя вихретокового контроля качества паяных соединений обмоток турбогенераторов // Дефектоскопия. 2014. № 5. С. 21—30. EDN: QNJJJU.

5. Горбунов А.Е., Ивкин А.Е., Сясько В.А. Вихретоковый преобразователь тангенциального типа с активным экранированием / Патент № 2808437. 28.11.2023. Бюл. № 34.

6. Горбунов А.Е., Ивкин А.Е., Соломенчук П.В. Тангенциальный вихретоковый преобразователь для контроля нахлесточных паяных соединений токоведущих шин электрических машин // Дефектоскопия. 2023. № 11. С. 54—56. DOI: 10.31857/S0130308223110052. EDN: XBBNOM.

7. Горбунов А.Е., Ивкин А.Е., Соломенчук П.В. Измерение степени пропаянности соединения токоведущих шин турбогенераторов с использованием тангенциального вихретокового преобразователя с активным экранированием / Физические методы неразрушающего контроля (Янусовские чтения). Тезисы докл. XXXIV Уральской конф. (Пермь, 20—21 апреля 2023 г.) Екатеринбург. 2023. С. 36—37. EDN: SDFMTA.

8. Kogan L., Nichipuruk A., Savary F., Principe R., Datskov V., Rozenfel'd E., Khudjakov B. Eddy Current Quality of Soldered Current-Carrying Bus-Bar Splices of Superconducting Magnets // Insight. 2015. No. 12. P. 697—702. doi.org/10.1784/insi.2015.57.12.697

9. Gromyka D.S., Gogolinskiy K.V. Method of State and Residual Resource Assessment of Excavator Bucket Tooth Caps // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 5. P. 381—390. doi.org/10.1134/S1061830922050035

10. Коган Л.Х., Сташков А.Н., Ничипурук А.П. Вихретоковый контроль качества пайки сверхпроводящих токоведущих соединений с учетом влияния вариации их сечения на результаты контроля // Дефектоскопия. 2019. № 9. С. 20—28. doi.org/10.1134/S0130308219090033

11. Коган Л.Х., Сташков А.Н., Ничипурук А.П. Контроль качества пайки боковых стенок хомутов в токоведущих соединениях электрических машин с учетом влияния их размеров // Дефектоскопия. 2022. № 12. С. 59—69. doi.org/10.31857/S0130308222120065

12. Kogan L.H., Stashkov A.N., Nichipuruk A.P. Improving the Reliability of Eddy-Current Quality Control of Soldering in Current-Carrying Copper Joints and Expanding the Nomenclature of Inspected Joints in Energy Equipment // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 784—791. doi.org/10.1134/S1061830918110049

13. Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V., Anosov M.S. Ultrasonic and eddycurrent fatigue monitoring of austenitic steel welded joints // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 7. P. 570—578. doi.org/10.1134/S1061830921090126

14. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.

15. Delphine D., Pedreira D., Verbeke D., Leconte V., Wendling P., Loic R., Mazauric V. Adaptive Meshing for Eddy Current Calculations // IEEE Transactions on Magnetics. 2015. V. 51. No. 11. P. 1—4. doi.org/10.1109/TMAG.2015.2445830

16. Teterko A.Y., Uchanin V.M., Hutnyk V.I. Improvement of the Accuracy of Eddy-Current Testing of the Electric Conductivity of Materials and the Thickness of Dielectric Coatings of the Shells // Mater Sci. 2014. V. 49. P. 857—865. doi.org/10.1007/s11003-014-9684-9

17. Markov A.A., Mosyagin V.V., Antipov A.G., Ivanov G.A. The Possibility of Detecting Defects in Rail Foot by the MFL Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2024. V. 60. No. 1. P. 63—74. doi.org/10.1134/S1061830923601459

18. Antti Lehtikoinen, Antero Arkkio, Anouar Belahcen. Reduced Basis Finite Element Modeling of Electrical Machines with Multiconductor Windings // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. V. 53. No. 5. P. 4252—4259. doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732918

19. Гоголинский К.В., Ивкин А.Е., Алехнович В.В., Васильев А.Ю., Тюрнина А.Е., Васильев А.С. Оценка показателей точности определения толщины покрытий методом шарового истирания // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 7. С. 39—44. doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-39-44

REFERENCES

1. Syasko V.A., Chertov D.N. lamination detection in carbon fiber reinforced plastics with the use of tangential eddy current transducers // V mire nerazrushayushchego kontrolya [In the world of nondestructive testing]. 2012. No. 2. P. 19—21. (In Russian).
2. Suchkov G.M., Khomyak Yu.V. Improvement of possibilities of eddy current surface inspection of continuously cast slabs from ferromagnetic steels // Defectoscopya. 2013. No. 1. P. 78—83. (In Russian).
3. Syasko V.A., Chertov D.N., Ivkin A.E. Measuring the thicknesses of the walls of carbon composite materials using the eddy-current phase method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2011. V. 47. P. 561—567. doi.org/10.1134/S1061830911080109
4. Potapov A.I., Koroteev M.Yu., Syasko V.A., Solomenchuk P.V. A finite-element modeling of a probe of eddy-current quality testing of soldered joints in turbogenerator windings // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2014. V. 50. No. 5. P. 264—273. doi.org/10.1134/S1061830914050064
5. Gorbunov A.E., Ivkin A.E., Syasko V.A. Tangential type eddy current converter with active shielding. Patent RF. No. 2808437. 28.11.2023. (In Russian).
6. Gorbunov A.E., Ivkin A.E., Solomenchuk P.V. Tangential eddy current probe for testing of soldered joints of busbars in electrical machines // Defectoscopya. 2023. No. 11. P. 54—56. doi.org/10.31857/S0130308223110052 (in Russian).
7. Gorbunov A.E., Ivkin A.E., Solomenchuk P.V. Measurement of the degree of soldering of turbine generator busbar connections using a tangential eddy current transducer with active shielding / Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya (Yanusovskie chteniya) tezisy dokl. XXXIV Ural'skoi konf, Perm', 20—21 aprelya 2023 g. [Physical methods of nondestructive testing (Janusov readings) Abstracts of Papers of the XXXIV Ural Conf., Perm, April 20—21, 2023]. Ekaterinburg, 2023. P. 36—37. EDN: SDFMTA. (in Russian).
8. Kogan L., Nichipuruk A., Savary F., Principe R., Datskov V., Rozenfel'd E., Khudjakov B. Eddy Current Quality of Soldered Current-Carrying Bus-Bar Splices of Superconducting Magnets // Insight. 2015. No. 12. P. 697—702. doi.org/10.1784/insi.2015.57.12.697
9. Gromyka D.S., Gogolinskiy K.V. Method of State and Residual Resource Assessment of Excavator Bucket Tooth Caps // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 5. P. 381—390. doi.org/10.1134/S1061830922050035
10. Kogan L.H., Stashkov A.N., Nichipuruk A.P. Eddy current quality control of soldering in superconducting current-carrying joints with allowance for the effect of cross section variations on testing results // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 9. P. 654—662. doi.org/10.1134/S0130308219090033
11. Kogan L.H., Stashkov A.N., Nichipuruk A.P. Eddy current NDT of the soldering of the side walls of clamps in the current-carrying joints of electrical machines, taking into account the influence of their sizes // Defectoscopya. 2022. No. 12. P. 59—69. doi.org/10.31857/S0130308222120065
12. Kogan L.H., Stashkov A.N., Nichipuruk A.P. Improving the Reliability of Eddy-Current Quality Control of Soldering in Current-Carrying Copper Joints and Expanding the Nomenclature of Inspected Joints in Energy Equipment // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 784—791. doi.org/10.1134/S1061830918110049
13. Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V., Anosov M.S. Ultrasonic and eddycurrent fatigue monitoring of austenitic steel welded joints // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. V. 57. No. 7. P. 570—578. doi.org/10.1134/S1061830921090126
14. RMG 29-2013 State system for ensuring the uniformity of measurements. Metrology. Basic terms and definitions. (In Russian).
15. Delphine D., Pedreira D., Verbeke D., Leconte V., Wendling P., Loic R., Mazauric V. Adaptive Meshing for Eddy Current Calculations // IEEE Transactions on Magnetics. 2015. V. 51. No. 11. P. 1—4. doi.org/10.1109/TMAG.2015.2445830
16. Teterko A.Y., Uchanin V.M., Hutnyk V.I. Improvement of the Accuracy of Eddy-Current Testing of the Electric Conductivity of Materials and the Thickness of Dielectric Coatings of the Shells // Mater. Sci. 2014. V. 49. P. 857—865. doi.org/10.1007/s11003-014-9684-9
17. Markov A.A., Mosyagin V.V., Antipov A.G., Ivanov G.A. The Possibility of Detecting Defects in Rail Foot by the MFL Method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2024. V. 60. No. 1. P. 63—74. doi.org/10.1134/S1061830923601459
18. Antti Lehtikoinen, Antero Arkkio, Anouar Belahcen. Reduced Basis Finite Element Modeling of Electrical Machines with Multiconductor Windings // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. V. 53. No. 5. P. 4252—4259. doi.org/10.1109/ICELMACH.2016.7732918
19. Gogolinsky K.V., Ivkin A.E., Alekhovich V.V., Vasiliev A.Y., Tyurnina A.E., Vasiliev A.S. Evaluation of the Accuracy Indicators in Determination of the Coating Thickness by Crater Grinding Method // Ind. Lab. Diagn. Mater. 2020. V. 86. No. 7. P. 39—44. doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-39-44 (in Russian).

ОБРАТНЫЙ РАСЧЕТ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОИСТЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ)

© 2024 г. А.Н. Тиратурян^{1,*}

¹Донской государственной технической университет, Россия 344000 Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
E-mail: *tiraturjan@list.ru

Поступила в редакцию 28.05.2024; после доработки 01.07.2024
Принята к публикации 12.07.2024

Статья посвящена совершенствованию метода обратного расчета модулей упругости слоев дорожных одежд автомобильных дорог в динамической постановке, предполагающего анализ характеристик деформирования во временной области. Для решения этой проблемы математическая модель слоистого полупространства адаптирована к вычислению амплитудно-временных характеристик деформирования на поверхности слоистой среды и построению соответствующих им чаш максимальных значений вертикальных перемещений. Выполнена корректировка расчетных значений вертикальных перемещений относительно зарегистрированных экспериментальных перемещений в полевых условиях. Продемонстрировано соответствие между итоговыми значениями максимальных вертикальных перемещений, амплитудно-временных характеристик на поверхности слоистой среды и формами и площадями динамических петель гистерезиса на поверхности исследуемой среды, достигнутое при корректировке расчетных характеристик относительно экспериментальных. Впервые при решении задачи определения механических параметров слоистой среды в качестве одного из параметров, их характеризующих, предложено рассматривать динамические петли гистерезиса и соответствие их расчетных и экспериментальных площадей как критерий адекватности достигнутого результата.

Ключевые слова: обратная задача, модули Юнга, амплитудно-временная характеристика перемещений, петля гистерезиса, установка ударного нагружения.

BACKCALCULATION OF ELASTIC MODULI OF ELEMENTS OF LAYERED HALFSPACE ON THE BASIS OF DYNAMIC DEFORMATION ANALYSIS (BY THE EXAMPLE OF HIGHWAYS)

© 2024 A. N. Tiraturyan^{1,*},

¹Don State Technical University, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1
E-mail: *tiraturjan@list.ru

The paper is devoted to the improvement of the method of inverse calculation of elasticity moduli of layers of motorway pavements in the dynamic setting, which involves the analysis of deformation characteristics in the time domain. To solve this problem, the mathematical model of a layered half-space is adapted to the calculation of amplitude-time characteristics of deformation on the surface of the layered medium, and the construction of the corresponding bowls of maximum values of vertical displacements. Adjustment of the calculated values of vertical displacements with respect to the registered experimental displacements in the field was performed. The correspondence between the final values of maximum vertical displacements, amplitude and time characteristics on the surface of the layered medium, and the shapes and areas of dynamic hysteresis loops on the surface of the investigated medium, achieved by adjusting the calculated characteristics relative to the experimental ones, has been demonstrated. For the first time in solving the problem of determining the mechanical parameters of a layered medium, it was proposed to consider dynamic hysteresis loops as one of the parameters characterising them and the correspondence of their calculated and experimental areas as a criterion of the adequacy of the achieved result.

Keywords: inverse problem, Young's moduli, amplitude-time characteristic of displacements, hysteresis loop, falling weight deflectometer.

DOI: 10.31857/S0130308224080059

ВВЕДЕНИЕ

Стадия эксплуатации автомобильной дороги является одним из важнейших этапов ее жизненного цикла. Неверно принятые решения в части выбора мероприятий по ее ремонту и восстановлению на этапе эксплуатации могут привести к значительным финансовым потерям и уменьшению срока ее эксплуатации. Принятие подобных решений на основе анализа структурного состояния дорожной одежды автомобильных дорог с применением методов неразрушающего контроля стало одним из основных трендов в практике как Российской, так и мировой диагностики.

В основной своей части теоретической основой применяемых методов неразрушающего контроля структурного состояния автомобильных дорог являются обратные коэффициентные

задачи [1—3]. К этому классу задач относят задачи, в которых по функциям перемещений, напряжений или деформации $u(t)$, $\sigma(t)$, $\varepsilon(t)$ восстанавливаются коэффициенты исходных определяющих уравнений.

В дорожной отрасли основной исследуемой характеристикой как правило выступает характеристика вертикальных перемещений $u(R, t)$, регистрируемая на поверхности автомобильной дороги в ходе ее эксплуатации с использованием специализированных установок динамического нагружения, оснащенных различным количеством датчиков геофонов, расположенных на расстоянии R от точки ударного нагружения. Группа методов, решающих задачу определения модулей Юнга материалов конструктивных слоев дорожных одежд, получила название Backcalculation [4—9].

В привязке к задачам неразрушающего контроля в дорожной отрасли метод Backcalculation был детально разработан в части постановки и решения статической прямой задачи определения напряженно-деформированного состояния слоистой среды и методов регуляризации полученного решения прямой задачи относительно экспериментальной характеристики, регистрируемой в полевых условиях [10—12]. При этом основной упор делался именно на совершенствование процедур численной регуляризации, так как до текущего момента вопрос устойчивости процедуры численной корректировки и единственности получаемых решений остается одним из самых «тонких» мест данной процедуры [13—15].

Тем не менее в 2017 г. был выпущен документ «Enhanced Analysis of Falling Weight Deflectometer Data for Use With Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design and Analysis and Recommendations for Improvements to Falling Weight Deflectometers» [16] во многом обобщивший существующий на тот момент передовой опыт статического и динамического обратного расчета. В нем был предложен один из вариантов перехода от дискретной характеристики — чаще прогибов, характеризующей только максимальные значения амплитудно-временной характеристики перемещений, к непрерывной — амплитудно-временной характеристике перемещений. В рамках данного документа были рассмотрены два основных случая: модели LAVA и LAVAN. Модель LAVA предполагает, что вязкоупругие свойства характерны только для слоев асфальтобетона, а нижележащие слои работают исключительно как упругие. LAVAN предполагает возможность задания аналогичных характеристик и для слоев оснований, дополнительных слоев оснований и слоев грунта земляного полотна. Но при сравнении данного решения с замеренными в полевых условиях амплитудно-временными характеристиками и другими аналогичными моделями в ряде случаев были установлены неточности и ограничения, связанные с разными подходами и оставляющие простор для дальнейших исследований в данном направлении [17—21].

В Российской практике данная методика также развивается. Основной подход к реализации процедуры «обратного» расчета базируется на трудах М.Г. Селезнева, А.А. Ляпина, Е.В. Глушкова [22—24]. В работах [25, 26] проведены исследования, позволяющие в значительной степени повысить точность и устойчивость соответствующих методов за счет более оптимальных процедур численного интегрирования.

Целью данной статьи является разработка и реализация подхода к определению модулей упругости элементов слоистых сред на стадии эксплуатации (на примере автомобильных дорог), обеспечивающего соответствие между экспериментальными и расчетными характеристиками деформирования, такими как амплитудно-временная характеристика перемещений и динамические петли гистерезиса, регистрируемыми при динамическом нагружении измерительными установками на различном срок их эксплуатации.

Таким образом, поставленная в рамках данной статьи задача является актуальной, научно и практически значимой, а совершенствование методов обратного расчета позволит в значительной степени повысить точность и качество принимаемых решений.

МЕТОДЫ

В наиболее общем случае реализация метода обратного расчета модулей Юнга слоев дорожной одежды предполагает три основных этапа:

- регистрацию характеристик отклика слоистой среды на ударное воздействие, воспроизводимое установками динамического нагружения в ходе натурных испытаний на определенном этапе эксплуатации объекта;

- построение расчетных характеристик отклика на поверхности слоистой среды с помощью математической модели при начальных (проектных) значениях механических параметров слоев.

- корректировка расчетных характеристик отклика относительно экспериментальных (до достижения между ними соответствия в заданных пределах) и определение «эксплуатационных» значений параметров, при которых это соответствие достигается.

В качестве экспериментального оборудования для неразрушающего контроля состояния дорожных одежд на автомобильных дорогах основное распространение получили установки ударного нагружения FWD, представляющие собой прицеп с оборудованным на нем механизмом ударного нагружения и балкой, оснащенной датчиками-геофонами, регистрирующими вертикальную компоненту скорости колебаний точек покрытия, преобразуемую впоследствии в перемещение. Механизм ударного нагружения позволяет воспроизводить нагрузку величиной от 2 до 130 кН с настраиваемым временем импульса.

Непосредственно, процесс измерений предполагает серию сбросов груза с регистрацией вертикальных компонент перемещений на поверхности покрытия, формирующих так называемую «чашу прогиба».

Обработка результатов экспериментальных измерений предполагает последующее применение математической модели, позволяющей осуществить построение аналогичной расчетной чаши прогибов по проектным или нормативным параметрам дорожной одежды, и с применением численных методов оптимизации осуществить корректировку расчетной чаши относительно экспериментальной, соответствующим образом подобрав механические параметры слоев дорожной одежды. Основным параметром, определяющим структурное состояние слоев дорожной одежды в дорожной практике, выступает модуль Юнга (модуль упругости) слоя.

Вместе с тем динамическая схема испытаний накладывает ограничения на расчетные методы и модели, так как требует не только применения эффективных вычислительных алгоритмов, позволяющих строить решения задачи определения динамического напряженно-деформированного состояния слоистой среды, но и корректного подбора формы импульса ударного нагружения, соответствующего импульсу, непосредственно приложенному к покрытию на момент проведения полевых испытаний.

В рамках данных исследований динамическая задача решалась в следующей постановке. Рассматривается многослойное полупространство, на поверхность которого прикладывается нагрузка, распределенная по круговому отпечатку. Слои характеризуются модулями Юнга, коэффициентами Пуассона, плотностями и толщинами. Общий вид слоистой полупространства представлен на рис. 1.

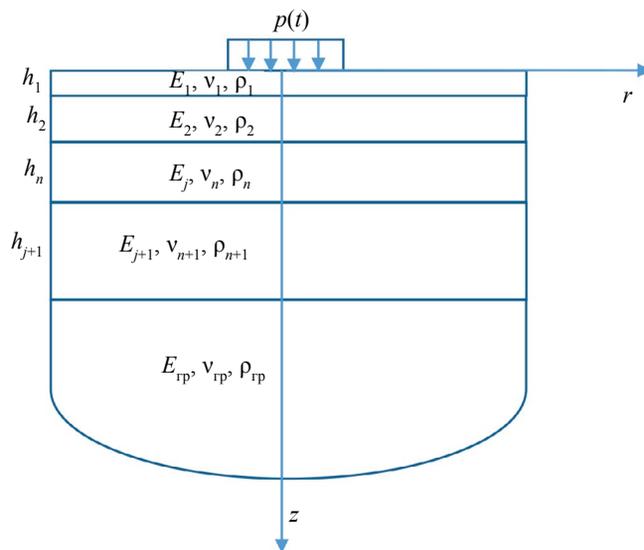


Рис. 1. Слоистая среда, описывающая конструкцию дорожной одежды автомобильной дороги.

Основные допущения, принятые в рамках данной модели:

- все слои являются изотропными;
- слой грунта земляного полотна моделируется в виде упругого полупространства, не ограниченного по глубине, а остальные слои не ограничены по ширине;
- нагрузка распределена равномерно по круговому отпечатку.

При реализации данной модели в упругой постановке механические параметры среды характеризуются модулями Юнга и коэффициентами Пуассона. В дальнейшем в рамках решения обратной задачи принимается допущение, что в процессе эксплуатации изменяются только модули Юнга слоев рассматриваемой конструкции. Коэффициенты Пуассона характеризуются постоянными значениями. При переходе к вязкоупругой постановке начальные значения моду-

лей Юнга задаются в комплексном виде либо задаются проектные значения модулей Юнга и тангенсы углов потерь продольных и поперечных волн.

Динамическое деформирование среды описывается системой уравнений Ламе, представимой в виде:

$$\nabla \nabla \cdot \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) - \frac{\theta_{j1}^2}{\theta_{j2}^2} \nabla \times \nabla \times \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) + \theta_{j1}^2 \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) = 0, \quad (1)$$

$\theta_{j1}^2 = \omega^2 / V_{pj}^2$, $\theta_{j2}^2 = \omega^2 / V_{sj}^2$ — приведенные частоты колебаний; $V_{pj} = \sqrt{(\lambda_j + 2\mu_j) / \rho_j}$, $V_{sj} = \sqrt{\mu_j / \rho_j}$ — скорости распространения продольных и поперечных волн в j -й среде.

При решении задачи в вязкоупругой постановке приведенные частоты колебаний становятся комплексными. Диссипация энергии вводится путем учета тангенсов углов потерь продольных и поперечных волн, определяемых как

$$\operatorname{tg} \gamma_p = \frac{\operatorname{Im} \theta_p^2}{\operatorname{Re} \theta_p^2}; \quad \operatorname{tg} \gamma_s = \frac{\operatorname{Im} \theta_s^2}{\operatorname{Re} \theta_s^2}. \quad (2)$$

Комплекснозначное представление приведенных частот колебаний возможно при применении модели комплексного модуля Юнга вида:

$$E(\omega) = \frac{E}{1 + m_1 (i\omega\eta)^{-m_2} + (i\omega\eta)^{-m_3}}, \quad (3)$$

где E — мгновенный модуль упругости, МПа; k_1, k_2, k_3 — эмпирические коэффициенты, подбираемые в ходе лабораторных испытаний слоев асфальтобетона; ω — циклическая частота колебаний; η — параметр вязкости асфальтобетона, также определяемый по данным лабораторных испытаний.

Решение системы уравнений (2) строится с применением интегрального преобразования Фурье и принципа предельного поглощения. Детально принципы решения данных задач изучены и изложены как для случая упругого полупространства, так и слоистых сред в трудах [21—25]. Решение нестационарной задачи динамики в рамках данной задачи осуществляется путем применения метода дискретного гармонического анализа позволяющего построить нестационарное решение в виде набора решений для установившихся колебаний.

Перемещения $u_{r,z}(r, z, t)$ на поверхности всей конструкции и в каждом слое отыскиваются методом дискретного гармонического анализа путем разложения данных функций в ряд Фурье:

$$u_{r,z}^{(M)}(r, z, t) = \sum_{k=1}^M p_k \left\{ \begin{aligned} & -\cos \eta_k \operatorname{Im} [U_{r,z}(r, z, \omega_k) \exp(-i\omega_k t)] + \\ & + \sin \eta_k \operatorname{Re} [U_{r,z}(r, z, \omega_k) \exp(-i\omega_k t)] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

через коэффициенты разложения p_k импульса нагрузки $p(t)$ в классе периодических, финитных на отрезке $t \in D = \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2} + t_{\text{имп}} \right]$ функций:

$$p_k = \int_0^t \sin(\omega_k t + \eta_k) p(t) dt.$$

Здесь $\eta_k = 0,5 \cdot k \cdot \pi \cdot T / (T + t_{\text{имп}})$, $\omega_k = k\pi / (T + t_{\text{имп}})$; T — необходимое предельное время наблюдения за процессом до его затухания.

Функции $U_{r,z}(r, z, \omega)$ представляют собой решения задачи о стационарных колебаниях (с частотой ω) нормальной поверхностной нагрузки, распределенной по площади круга радиуса R для уравнений (1) с преобразованной для этого случая правой частью.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Реализация динамического обратного расчета осуществлялась для слоистой среды, представленной конструкцией дорожной одежды со следующими параметрами (табл. 1).

Расчетные характеристики тестовой конструкции дорожной одежды автомобильной дороги

Слой	Толщина, см	Модуль Юнга (начальные значения), МПа	Коэффициент Пуассона
Асфальтобетон	20	2700	0,30
Слой основания (щебень фракционированный)	20	450	0,27
Дополнительный слой основания (щебеночно-песчаная смесь)	43	260	0,27
Земляное полотно (суглинок тяжелый)		47	0,35

Данная конструкция эксплуатируется на протяжении 7 лет с момента окончания строительства и характеризуется очевидным ухудшением жесткостных характеристик, проявляющихся на поверхности в виде дефектов покрытия — продольных и поперечных трещин, а также локальных сеток трещин. Прямое определение модулей Юнга слоев для эксплуатируемых конструкций в ходе разрушающего контроля не представляется возможным, так как для этих целей отсутствует лабораторное оборудование и схемы испытаний, и единственным путем получения фактических значений модулей Юнга для таких конструкций является выполнение неразрушающего контроля, предполагающего решение обратной задачи по восстановлению механических параметров слоистой среды, эксплуатируемой длительное время.

На поверхности данной конструкции были проведены экспериментальные измерения вертикальных перемещений с использованием установки ударного нагружения FWD.

Приближение расчетной формы импульса к экспериментальной было достигнуто за счет функции пилообразного сигнала, разложенного на 30 гармоник. Соответствие фактического импульса нагружения расчетному значению показано на рис. 2.

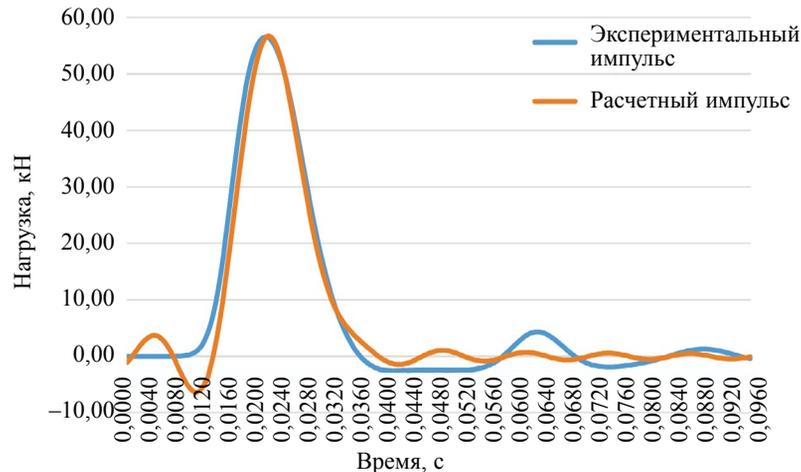


Рис. 2. Соответствие формы экспериментального импульса установки ударного нагружения расчетному импульсу.

Ниже представлено сопоставление расчетной и экспериментальной амплитудно-временной характеристики перемещений на поверхности покрытия (рис. 3). Как видно, при начальных значениях модулей упругости слоев дорожной одежды расчетная и экспериментальная формы амплитудно-временных характеристик деформирования значительно отличаются. Меньшие значения вертикальных перемещений на расчетной амплитудно-временной характеристике явно демонстрируют необходимость снижения модулей упругости конструктивных слоев дорожных одежд. В ходе вычислительного эксперимента, осуществляемого с применением метода оптимизации Левенберга—Марквардта, описанной для подобного класса задач в документе ГОСТ Р 59918—2021, было достигнуто удовлетворительное соответствие между формами расчетной и экспериментальной амплитудно-временных характеристик. В табл. 2 приведены результаты расчета модулей упругости слоев дорожной одежды, позволяющие достичь

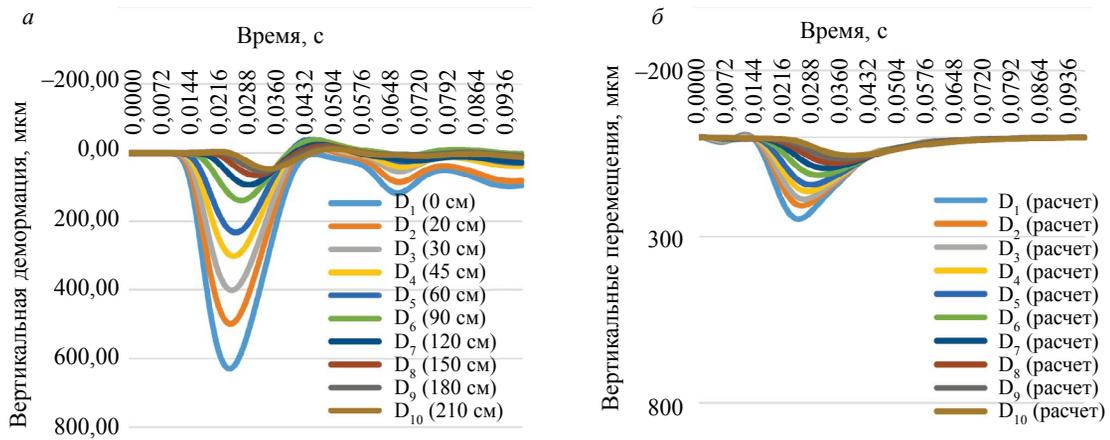


Рис. 3. Сопоставление экспериментальной и расчетной амплитудно-временных характеристик деформирования на поверхности слоистой среды (D_i — номер датчика (точки), в которой определяется амплитудно-временная характеристика).

Таблица 2

Начальные и расчетные значения модулей упругости слоев асфальтобетона после корректировки

Начальные значения модулей Юнга до корректировки, МПа	Расчетные значения модулей Юнга после корректировки, МПа
2700	1043
450	100
240	127
47	82

хорошего соответствия как пиковых значений экспериментальной амплитудно-временной характеристики деформирования ее расчетной форме, так и в целом обеспечить хорошее соответствие расчетной и экспериментальной амплитудно-временных характеристик во всей временной области (рис. 4).

Также для дополнительного контроля адекватности полученных результатов было осуществлено сопоставление расчетных и экспериментальных динамических петель гистерезиса на

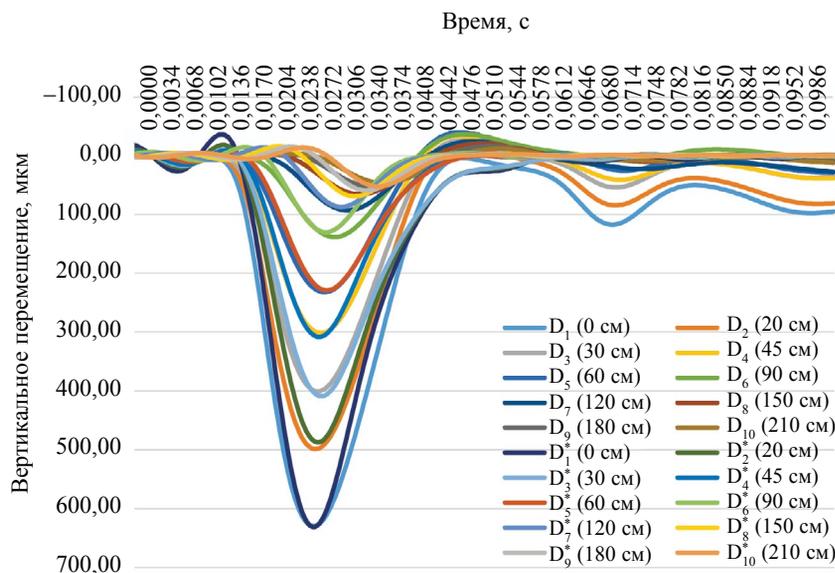


Рис. 4. Сопоставление экспериментальной и расчетной амплитудно-временных характеристик вертикальных перемещений после проведения корректировки (рядами D_i^* обозначены расчетные амплитудно-временные характеристики).

поверхности слоистой среды. Критерием соответствия в данном случае служит как визуальная схожесть их форм, так и количественный параметр в виде площади динамической петлей определяемый как

$$W = \int_0^t P(t)u(t)dt,$$

где W — площадь динамического гистерезиса, Дж/м³; $P(t)$ — временная характеристика импульса нагружения; $u(t)$ — амплитудно-временная характеристика деформирования.

Данная характеристика имеет физический смысл величины потерь энергии при ударном нагружении. В качестве количественного параметра соответствия расчетных и экспериментальных петлей динамического гистерезиса выступает погрешность в 10 % между величиной потерь энергии по каждому датчику. Результаты сопоставления приведены на рис. 5 и в табл. 3.

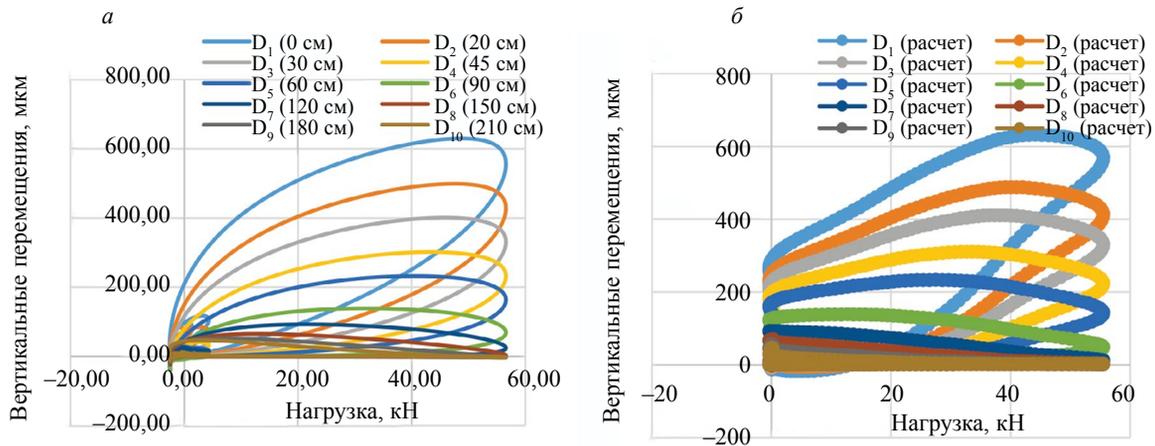


Рис. 5. Формы динамических петлей гистерезиса, зарегистрированные на поверхности дорожной одежды с использованием установки ударного нагружения и рассчитанные с использованием математической модели после корректировки.

Таблица 3

Площади динамических петлей гистерезиса, рассчитанные в ходе экспериментальных исследований и численного моделирования

	Площадь динамической петли, Дж/м ³									
	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D ₇	D ₈	D ₉	D ₁₀
Экспериментальная	20,05	16,59	14,09	11,30	9,26	6,25	4,39	2,88	1,92	1,29
Расчетная	20,31	17,62	15,81	11,52	10,04	6,38	4,7	3,08	1,73	1,2

Примененная в рамках данного исследования реализация метода обратного расчета модулей упругости по ряду параметров отличается от уже известных решений. Так, в качестве модельного импульса в рамках данного исследования была применена пилообразная модель импульса нагружения, практически полностью соответствующая форме импульса нагружения, воспроизводимого установками ударного нагружения FWD. В основной части известных на текущий момент работ, касающихся развития метода динамического обратного расчета, применяется синусоидальная форма. В качестве количественного параметра соответствия расчетных и экспериментальных параметров в рамках данной работы предложено анализировать форму и площадь динамической петли гистерезиса. Данная характеристика обладает рядом преимуществ перед амплитудно-временной характеристикой, анализируемой на текущий момент в большинстве зарубежных источников. Она интегрально отражает импульс нагружения и характеристики перемещений во временной области и во многом может служить наиболее эффективной формой отображения т.н. «полной чаши прогибов», т.е. процесса изменения вертикальных перемещений на поверхности покрытия автомобильной дороги за весь период наблюдения, а не только их пиковых значений в фиксированный момент времени. Также данный подход хорошо коррелирует с подходом, разработанным и изложенным автором в [26].

ВЫВОДЫ

Изложены концептуальные основы динамического метода обратного расчета и продемонстрирована возможность определения модулей упругости конструктивных слоев дорожных одежд автомобильных дорог, обеспечивающая возможность достижения соответствия как между пиковыми значениями амплитудно-временной характеристики перемещений на поверхности покрытия, так и обеспечения их соответствия во всей временной области.

Впервые предложено в качестве количественного параметра соответствия расчетных и экспериментальных параметров деформирования анализировать форму и площадь динамической петли гистерезиса, регистрируемой при ударном воздействии и рассчитываемой в ходе численного моделирования. Отмечено, что данная характеристика во многом превосходит традиционно применяемую при динамической постановке амплитудно-временную характеристику перемещений, так как интегрально отражает изменения импульса нагружения и вертикальных перемещений во временной области и полностью описывает процесс деформирования на поверхности конструкции при ударном нагружении.

Предложена математическая модель и продемонстрирована ее эффективность на примере эксплуатируемого участка автомобильной дороги, для которого по данным натуральных испытаний рассчитаны значения модулей Юнга, обеспечивающие практически полное соответствие экспериментально зарегистрированных параметров деформирования (импульс нагружения, амплитудно-временная характеристика нагружения, пиковые значения вертикальных амплитуд перемещений, форма динамической петли гистерезиса, площадь динамической петли) результатам численного моделирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00110 (<https://rscf.ru/project/24-29-00110/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватульян А.О. Коэффициентные обратные задачи термомеханики. Ростов-на-Дону, Таганрог: Южный федеральный университет, 2022. 178 с.
2. Ватульян А.О. К теории обратных задач в линейной механике деформируемого тела // Прикладная математика и механика. 2010. Т. 74. № 6. С. 909—916.
3. Ватульян А.О., Гукасян Л.С., Недин Р.Д. О задаче Коши в теории коэффициентных обратных задач для упругих тел // Владикавказский математический журнал. 2016. Т. 18. № 2. С. 31—40.
4. Wu C. Asphalt pavement modulus backcalculation using surface deflections under moving loads // Computer — Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2020. V. 35. No. 11. P. 1246—1260.
5. Nakhaei M., Timm D.H. A new methodology to improve backcalculation of flexible pavements with stabilized foundations // Construction and Building Materials. 2023. V. 368. P. 130405.
6. Elbagalati O., Mousa M., Elseifi M.A., Gaspard K., Zhang Z. Development of a methodology to backcalculate pavement layer moduli using the traffic speed deflectometer // Canadian Journal of Civil Engineering. 2018. V. 45. No. 5. P. 377—385.
7. Chou Y.J., Lytton R.L. Accuracy and consistency of backcalculated pavement layer moduli // Transportation research record. 1991. V. 1293. P. 72—85.
8. Harichandran R.S. Modified Newton algorithm for backcalculation of pavement layer properties // Transportation Research Record. 1993. V. 1384. P. 15.
9. Bayrak M.B., Guclu A., Ceylan H. Rapid pavement backcalculation technique for evaluating flexible pavement systems // Proceedings of the Mid Continent Transportation Research Symposium, Iowa. 2005. С. 319—326.
10. Guzina B.B., Osburn R.H. Effective tool for enhancing elastostatic pavement diagnosis // Transportation Research Record. 2002. V. 1806. No. 1. P. 30—37.
11. Fu G. Xue C., Zhao Y., Cao D., Alae M. Accuracy evaluation of statically backcalculated layer properties of asphalt pavements from falling weight deflectometer data // Canadian Journal of Civil Engineering. 2020. V. 47. No. 3. P. 317—325.
12. Lee Y.H., Ker H.W., Lin C.H., Wu P.H. Study of backcalculated pavement layer moduli from the LTPP database // Journal of Applied Science and Engineering. 2010. V. 13. No. 2. P. 145—156.
13. Sampei T., Matsui K., Inoue T. Comparative Study on Methods of Backcalculation for Pavement Structure // Doboku Gakkai Ronbunshu. 1992. V. 1992. No. 442. P. 237—240.
14. Gopalakrishnan K., Papadopoulos H. Reliable pavement backcalculation with confidence estimation // Scientia Iranica. 2011. V. 18. No. 6. P. 1214—1221.
15. Stubstad R.N., Jiang Y.J., Lukanen E.O. Review of the long-term pavement performance backcalculation results. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, 2006. № HRT-05-150.
16. Chatti K. Enhanced analysis of falling weight deflectometer data for use with mechanistic-empirical flexible pavement design and analysis and recommendations for improvements to falling weight deflectometers. Turner-Fairbank Highway Research Center, 2017. № FHWA-HRT-15-063.

17. Flores J.M., Lee H.J., Elipse C., Lee W., Kim K., Baek J. Dynamic backcalculation approach of deflections obtained from the rolling dynamic deflectometer: Fundamental theory // Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. 2021. V. 147. No. 1. P. 04020089.
18. Wang Y., Zhao Y., Zhang M., Fu G. Influence of bedrock on the dynamic deflection response and dynamic back-calculation results of asphalt pavement: Insights from the numerical simulation of falling weight deflectometer tests // Construction and Building Materials. 2022. V. 330. P. 127252.
19. Chatti K., Kutay M. E., Lajnef N., Zaabar I., Varma S., Lee H. Enhanced analysis of falling weight deflectometer data for use with mechanistic-empirical flexible pavement design and analysis and recommendations for improvements to falling weight deflectometers. Turner-Fairbank Highway Research Center, 2017. № FHWA-HRT-15-063.
20. Nasr C. Development of Seed Variables Prediction Models for Use in Dynamic Backcalculation of FWD Data: Lebanese American University, 2022.
21. Madsen S.S., Levenberg E. Dynamic backcalculation with different load-time histories // Road Materials and Pavement Design. 2018. V. 19. No. 6. P. 1314—1333.
22. Beskopylny A., Lyapin A., Andreev V. Layered structures mechanical properties assessment by dynamic tests // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. 2017. V. 117. P. 00018.
23. Тиратуриян А.Н., Ляпин А.А., Углова Е.В. Совершенствование неразрушающего метода определения механических характеристик элементов многослойных конструкций на примере дорожных одежд // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2023. № 1. С. 56—65. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06
24. Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.Ф. Динамика неоднородных линейно-упругих сред. М.: Наука, 1989. 343 с.
25. Бочкарев А.В., Землянухин А.И. Обратное вычисление послойных модулей упругости дорожных одежд // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. № 3 (94). С. 5—18.
26. Бочкарев А.В. Анализ надежности обратного расчета упругих параметров дорожных одежд // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2022. № 3 (33). С. 5.
27. Тиратуриян А.Н., Углова Е.В., Ляпин А.А. Энергетический метод определения остаточного ресурса нежестких дорожных одежд на стадии эксплуатации // Дефектоскопия. 2020. № 10. С. 71—80. DOI: 10.31857/S0130308220100073

REFERENCES

1. Vatulyan A.O. Coefficient inverse problems of thermomechanics. Rostov-on-Don, Taganrog: Southern Federal University, 2022. 178 p.
2. Vatulyan A.O. To the theory of inverse problems in linear mechanics of a deformable body // Applied Mathematics and Mechanics. 2010. V. 74. No. 6. P. 909—916.
3. Vatulyan A.O., Gukasyan L.S., Nedin R.D. On the Cauchy problem in the theory of coefficient inverse problems for elastic bodies // Vladikavkazskiy Mathematical Journal. 2016. V. 18. No. 2. P. 31—40.
4. Wu C. Asphalt pavement modulus backcalculation using surface deflections under moving loads // Computer — Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2020. V. 35. No. 11. P. 1246—1260.
5. Nakhaei M., Timm D.H. A new methodology to improve backcalculation of flexible pavements with stabilized foundations // Construction and Building Materials. 2023. V. 368. P. 130405.
6. Elbagalati O., Mousa M., Elseifi M.A., Gaspard K., Zhang Z. Development of a methodology to backcalculate pavement layer moduli using the traffic speed deflectometer // Canadian Journal of Civil Engineering. 2018. V. 45. No. 5. P. 377—385.
7. Chou Y.J., Lytton R.L. Accuracy and consistency of backcalculated pavement layer moduli // Transportation research record. 1991. V. 1293. P. 72—85.
8. Harichandran R.S. Modified Newton algorithm for backcalculation of pavement layer properties // Transportation Research Record. 1993. V. 1384. P. 15.
9. Bayrak M.B., Guclu A., Ceylan H. Rapid pavement backcalculation technique for evaluating flexible pavement systems // Proceedings of the Mid Continent Transportation Research Symposium, Iowa. 2005. C. 319—326.
10. Guzina B.B., Osburn R.H. Effective tool for enhancing elastostatic pavement diagnosis // Transportation Research Record. 2002. V. 1806. No. 1. P. 30—37.
11. Fu G. Xue C., Zhao Y., Cao D., Alae M. Accuracy evaluation of statically backcalculated layer properties of asphalt pavements from falling weight deflectometer data // Canadian Journal of Civil Engineering. 2020. V. 47. No. 3. P. 317—325.
12. Lee Y.H., Ker H.W., Lin C.H., Wu P.H. Study of backcalculated pavement layer moduli from the LTPP database // Journal of Applied Science and Engineering. 2010. V. 13. No. 2. P. 145—156.
13. Sampei T., Matsui K., Inoue T. Comparative Study on Methods of Backcalculation for Pavement Structure // Doboku Gakkai Ronbunshu. 1992. V. 1992. No. 442. P. 237—240.
14. Gopalakrishnan K., Papadopoulos H. Reliable pavement backcalculation with confidence estimation // Scientia Iranica. 2011. V. 18. No. 6. P. 1214—1221.

15. *Stubstad R.N., Jiang Y.J., Lukanen E.O.* Review of the long-term pavement performance backcalculation results. United States. Federal Highway Administration. Office of Infrastructure Research and Development, 2006. № HRT-05-150.
16. *Chatti K.* Enhanced analysis of falling weight deflectometer data for use with mechanistic-empirical flexible pavement design and analysis and recommendations for improvements to falling weight deflectometers. Turner-Fairbank Highway Research Center, 2017. № FHWA-HRT-15-063.
17. *Flores J.M., Lee H.J., Elipse C., Lee W., Kim K., Baek J.* Dynamic backcalculation approach of deflections obtained from the rolling dynamic deflectometer: Fundamental theory // *Journal of Transportation Engineering. Part B: Pavements.* 2021. V. 147. No. 1. P. 04020089.
18. *Wang Y., Zhao Y., Zhang M., Fu G.* Influence of bedrock on the dynamic deflection response and dynamic back-calculation results of asphalt pavement: Insights from the numerical simulation of falling weight deflectometer tests // *Construction and Building Materials.* 2022. V. 330. P. 127252.
19. *Chatti K., Kutay M. E., Lajnef N., Zaabar I., Varma S., Lee H.* Enhanced analysis of falling weight deflectometer data for use with mechanistic-empirical flexible pavement design and analysis and recommendations for improvements to falling weight deflectometers. Turner-Fairbank Highway Research Center, 2017. № FHWA-HRT-15-063.
20. *Nasr C.* Development of Seed Variables Prediction Models for Use in Dynamic Backcalculation of FWD Data: Lebanese American University, 2022.
21. *Madsen S.S., Levenberg E.* Dynamic backcalculation with different load-time histories // *Road Materials and Pavement Design.* 2018. V. 19. No. 6. P. 1314—1333.
22. *Beskopylny A., Lyapin A., Andreev V.* Layered structures mechanical properties assessment by dynamic tests // *MATEC Web of Conferences.* EDP Sciences. 2017. V. 117. P. 00018.
23. *Tiraturyan A.N., Lyapin A.A., Uglova E.V.* Improvement of the nondestructive method for determining the mechanical characteristics of the elements of multilayer structures on the example of road pavements // *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics.* 2023. No. 1. P. 56—65. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.1.06
24. *Babeshko V.A., Glushkov E.V., Zinchenko J.F.* Dynamics of inhomogeneous linear-elastic media. Moscow: Nauka, 1989. 343 p.
25. *Bochkarev A.V., Zemlyanukhin A.I.* Inverse calculation of layer-by-layer moduli of elasticity of road pavements // *Bulletin of Saratov State Technical University.* 2022. No. 3 (94). P. 5—18.
26. *Bochkarev A.V.* Reliability analysis of the inverse calculation of the elastic parameters of road pavements // *Avtomobil. Road. Infrastructure.* 2022. No. 3 (33). P. 5.
27. *Tiraturyan A.N., Uglova E.V., Lyapin A.A.* Energy method for determining the residual life of non-rigid road pavements at the operation stage // *Defectoscopya.* 2020. No. 10. P. 71—80. DOI: 10.31857/S0130308220100073

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО СТРУКТУРОСКОПА

© 2024 г. А. В. Бызов^{1,*}, О. Н. Василенко¹, Д. Г. Ксенофонтов¹, М. Г. Минин^{2,**},
И. А. Вайнштейн²

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

²Уральский федеральный университет, Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
E-mail: *byzovav@imp.uran.ru; **m.g.minin@urfu.ru

Поступила в редакцию 31.05.2024; после доработки 04.06.2024
Принята к публикации 07.06.2024

Описан процесс цементации и закалки сталей 45 и 09Г2С для изготовления образцов для разработки методики вихретокового контроля качества и толщины упрочненных слоев на ферромагнитных основаниях. Проведен структурный анализ образцов в исходном состоянии, в закаленном, а также после цементации и закалки. В результате металлографических исследований было получено, что глубина цементированного слоя стали 45 оказалась равной 250 мкм, а у стали 09Г2С находится в диапазоне 550—800 мкм.

Ключевые слова: цементация, закалка, упрочнение, глубина цементированного слоя, сталь, градуировочные образцы.

DEVELOPMENT OF CALIBRATION SAMPLES MADE OF STEEL 45 AND 09G2S FOR EDDY CURRENT STRUCTUROSCOPE BY CARBURIZING

© 2024 A.V. Byzov^{1,*}, O.N. Vasilenko¹, D.G. Ksenofontov¹, M.G. Minin^{2,**}, I.A. Weinstein²

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of UB RAS,
Russia 620108, Yekaterinburg, st. Sof' I Kovalevskoy, 18

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia 620002, Yekaterinburg, st. Mira, 19
E-mail: *byzovav@imp.uran.ru; **m.g.minin@urfu.ru

The paper describes the process of carburizing and hardening of 45 and 09G2S steels for the production of samples for the development of a technique for eddy current testing of the quality and thickness of hardened layers on ferromagnetic cores. Structural analysis of samples in the initial state, in the hardened state, as well as after carburizing and hardening was carried out. As a result of metallographic studies it was obtained that the depth of the cemented layer of steel 45 was equal to 250 microns, and in case of steel 09G2C it is in the range of 550-800 microns.

Keywords: carburization, quenching, hardening, depth of carburized layer, steel, calibration samples.

DOI: 10.31857/S0130308224080065

ВВЕДЕНИЕ

Цементацией называется процесс насыщения изделия углеродом, целью которого является повышение твердости на поверхности изделия. Увеличение твердости поверхности приводит к повышению износостойкости детали, при этом упругие свойства сердцевины препятствуют тому, что изделие может сломаться при изгибающих, ударных и вибрационных нагрузках.

Основными контролируемыми параметрами при цементации, как и в случае всех других методов поверхностного упрочнения, являются твердость и ее распределение при увеличении глубины, а также глубина слоя. Под глубиной упрочненного слоя понимается расстояние по нормали от внешней поверхности изделия до границы слоя, твердость которого по Виккерсу равна 550 HV. А под глубиной диффузионного слоя — расстояние от поверхности до точки с содержанием углерода, соответствующим исходному содержанию углерода в стали [1, 2]. Исходя из приведенных определений, можно сказать, что четкой взаимосвязи между указанными понятиями нет.

В настоящее время для контроля толщины в основном используются акустические [3], магнитные методы [4, 5] неразрушающего контроля. Однако акустические методы требуют наличие выраженной границы между сердцевиной и упрочненным слоем изделия. В случае магнитных методов, в частности [5], чувствительность к упрочненным слоям с толщиной меньше 3 мм может быть низкой. Но для контроля слоев меньшей толщины могут быть использованы вихретоковые методы неразрушающего контроля.

Применение вихретоковых методов для контроля поверхностных слоев, которые отличались бы по свойствам от материала сердцевин, остается актуальной задачей. В настоящее время объекты контроля покрытий в своем большинстве имеют следующие комбинации поверхностного слоя и основания: непроводящий ($\mu = 0$; $\sigma = 0$) слой на проводящем ($\mu = 0$; $\sigma \neq 0$) основании [6]; проводящий слой на проводящем основании [7]; непроводящий слой на ферромагнитном ($\mu \neq 0$; $\sigma \neq 0$) основании [8]; проводящий слой на ферромагнитном основании [9]. Поэтому представляет большой интерес разработка вихретоковых методов контроля ферромагнитных покрытий толщиной от 0 до 3 мм на ферромагнитных основаниях, которые получаются при поверхностной закалке или термохимической обработке поверхности.

При этом и акустические, и магнитные измерительные системы, равно как и вихретоковые, требуют наличия стандартных образцов, по варьируемой величине которых и величине измеряемого параметра измерительной системы строится градуировочная характеристика. Целью данной работы является разработка методики изготовления градуировочных образцов для дальнейшего их использования при измерениях вихретоковым структуроскопом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе из полос из сталей 45 и 09Г2С была изготовлена серия образцов, которые были подвержены либо только закалке, либо цементации и закалке, либо оставались в состоянии поставки. Размеры образцов составили $50 \times 50 \times 4$ мм.

Цементируемые образцы подвергались твердой цементации, т. е. цементация осуществлялась с использованием карбюризатора. Сам карбюризатор представлял собой смесь из активированного угля (90 %) и углекислого бария (10 %). Время цементации составило для образца из стали 45 составило 3 ч, а для образцов из стали 09Г2С — 3 и 5,5 ч. Температура, при которой образцы цементировались, была 920 °С. Такая температура превышает температуры закалки данных сталей, которые определялись по справочным данным [10] на основе указываемых критических температур A_{c3} , чего требует технология цементации.

Закалка образцов осуществлялась при температуре 850 °С. Время выдержки при данной температуре в муфельной печи составило 16 мин. Время рассчитывалось формулам, приведенных в [11]. Закалка осуществлялась в воду.

Исследование микроструктуры образцов производилось на цифровом микроскопе Carl Zeiss AxioVert 40 MAT. Боковые грани образцов, вдоль которых производилась резка, были отшлифованы с помощью набора наждачной бумаги с зернистостью в диапазоне 60—2500. На полировальном круге в течение 5—10 мин боковые грани образцов обрабатывались оксидом хрома. Травление поверхности боковой грани образца производилось в 4 %-растворе азотной кислоты в этиловом спирте в течение 6 с. С помощью микроскопа исследовалась структура и оценивалась толщина цементированного слоя. Для подтверждения результатов измерения глубины цементированного слоя были проведены исследования на сканирующем нанотвердомере Nysitron TI 750 Ubi, величина максимальной нагрузки при исследованиях составила 6 мН, индентирование выполнялось по диаграмме нагружения, применявшейся ранее в изучении наномеханических свойств материалов различной природы [12],[13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 и 2 представлены изображения структуры исследованных образцов из стали 45 и стали 09Г2С соответственно. Увеличение, при котором были получены изображения структуры сердцевин, было $\times 500$. Увеличение, при котором были получены изображения структуры образцов на поверхности при наличии цементированного слоя, было $\times 50$.

Как видно из представленных фотографий, исходная структура углеродистой доэвтектоидной стали Ст45 представляла собой перлит и феррит. Структура закаленной Ст45 представляет собой мелкоугольчатый мартенсит с меньшим размером зерна по сравнению с исходным состоянием стали. Можно заметить, что сердцевина цементированной стали имеет аналогичную структуру, что говорит о том, что процесс цементации не повлиял на структуру сердцевин. Основываясь на рис. 1з, можно утверждать, что глубина цементированного (диффузионного) слоя составляет 250 мкм.

Исходная структура доэвтектоидной стали 09Г2С так же представляет собой смесь феррита и перлита, но с заметно большим содержанием ферритной фазы и крупным зерном феррита. После закалки также можно отметить мелкозернистую мартенситную фазу в сердцевине образцов. Из представленных изображений на рис. 2в и 2г можно отметить, что время цементации прямо влияет на глубину цементированного слоя. В случае, когда время цементации составляло

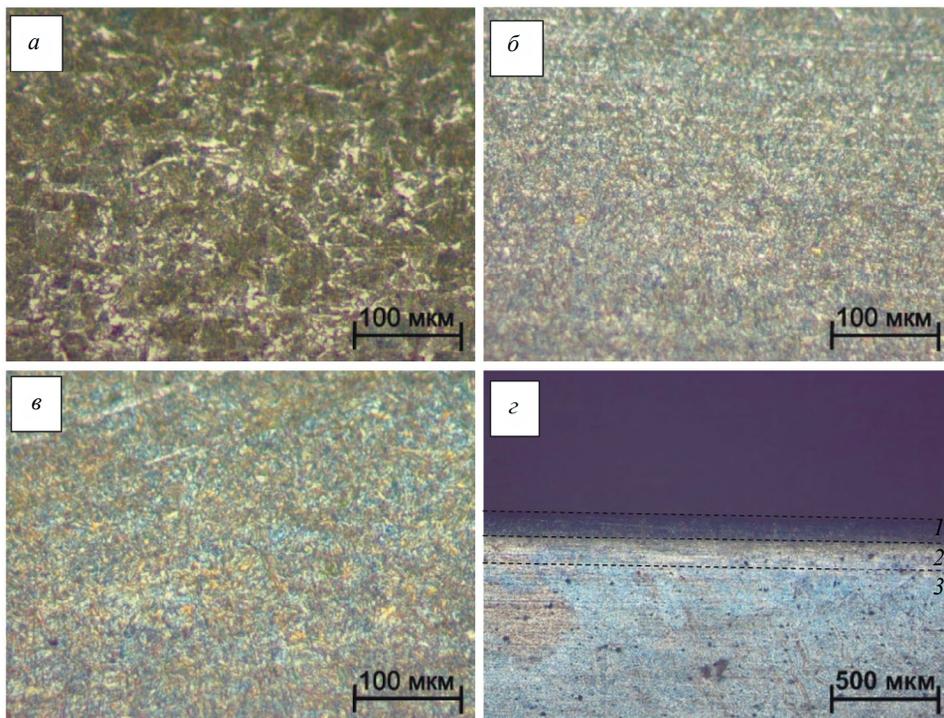


Рис. 1. Структуры образцов из стали 45: *a* — исходное состояние; *б* — после закалки; *в* — после цементации и закалки (сердцевина); *г* — после цементации и закалки (поверхность); 1 — поверхностный слой; 2 — переходный слой; 3 — сердцевина.

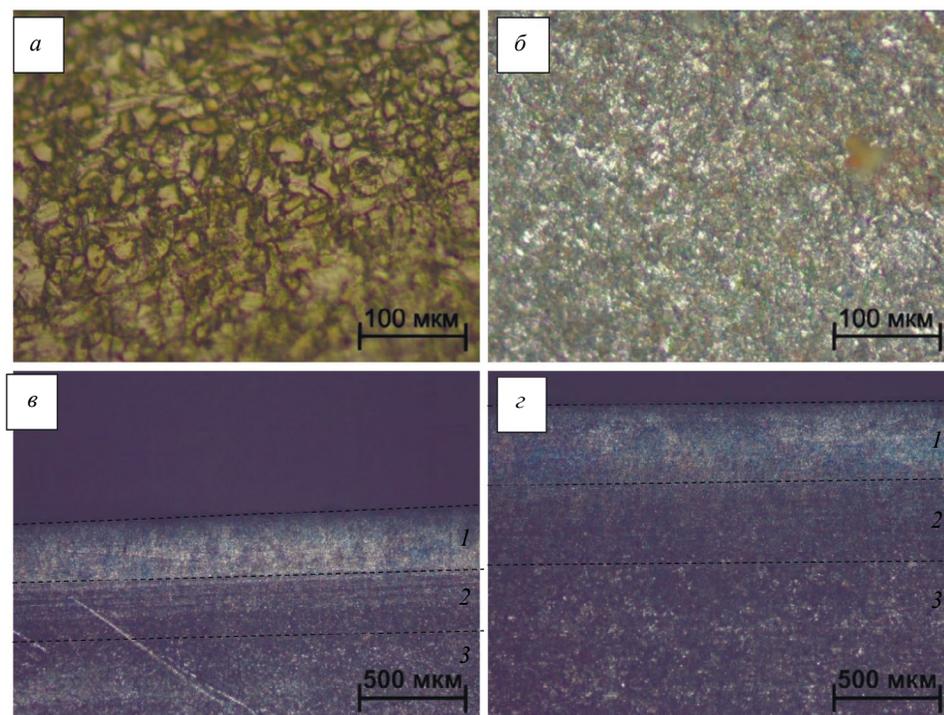


Рис. 2. Структуры образцов из стали 09Г2С: *a* — исходное состояние; *б* — после закалки; *в* — после цементации (3 ч) и закалки; *г* — после цементации (5,5 ч) и закалки; 1 — поверхностный слой; 2 — переходный слой; 3 — сердцевина.

3 ч, глубина слоя оказалась равной 550 мкм и 800 мкм при длительности цементации 5 ч. Глубина слоя у 09Г2С при цементации в течение 3 ч оказалась выше, чем у стали 45.

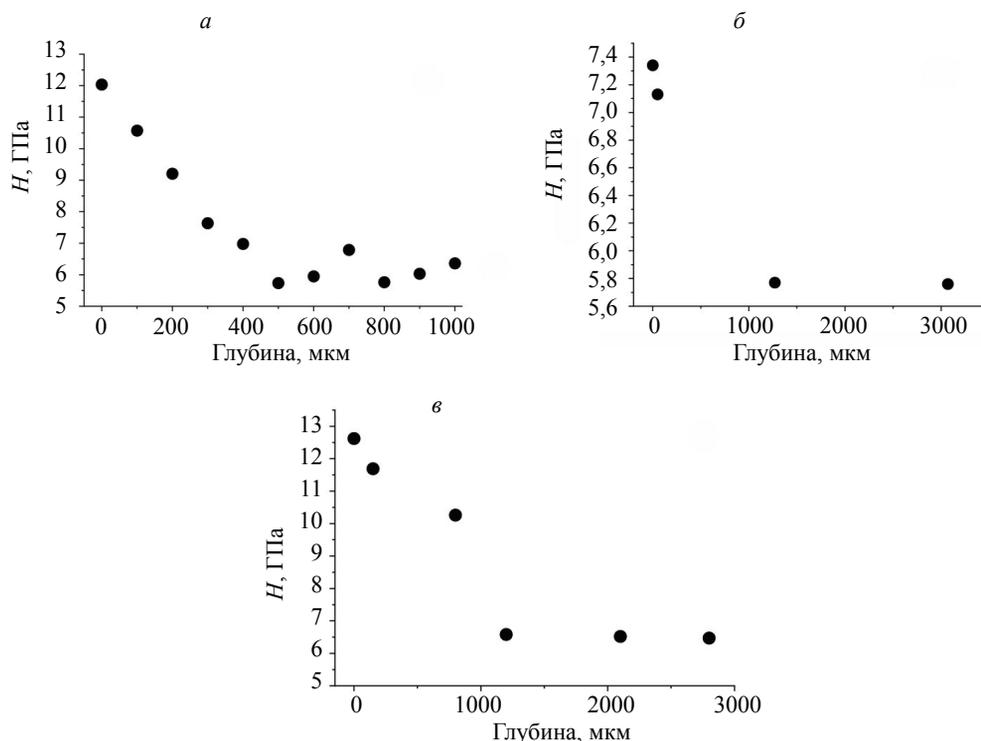


Рис. 3. Профили твердости образцов после закалки и цементации: *a* — Ст45; *б* — 09Г2С (3 ч); *в* — 09Г2С (5,5 ч).

На рис. 3 показаны профили твердости цементированных образцов в зависимости от глубины.

По результатам, показанным на рис. 3, можно отметить, что образец из стали 45 был процементирован на глубину 400—500 мкм. В сравнении с ним, в образцах из сталей с меньшим изначальным содержанием углерода углерод продиффундировал на большие глубины. Глубина цементации для образца из 09Г2С, который цементировался в течение 3 ч, составила не больше 1250 мкм, а для образца из 09Г2С, который цементировался в течение 5,5 ч, — 800—1200 мкм. Наблюдаемые результаты, полученные с помощью микроскопа и нанотвердомера, согласуются между собой.

ВЫВОДЫ

В работе подробно описан процесс цементации и закалки сталей 45 и 09Г2С. Получены изображения в микроскопе образцов в исходном состоянии, в закаленном, а также после цементации и закалки. В результате металлографических исследований и исследований на нанотвердомере были получены схожие результаты измерения глубины цементированного слоя, благодаря чему можно судить о глубине слоя в стальном изделии.

В дальнейшей работе образцы с различными глубинами цементированных слоев будут использоваться в качестве градуировочных при разработке методики и аппаратуры вихрекового контроля глубины поверхностного упрочнения стальных изделий.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майсурадзе М.В., Рыжков М.А., Беликов С.В., Корниенко О.Ю., Карабанов М.С., Жиляков А.Ю. Цементация, нитроцементация и азотирование стальных изделий / Учебное пособие. Мин-во науки и высшего образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 102 с.
2. ГОСТ 33439—2015. Металлопродукция из черных металлов и сплавов на железоникелевой и никелевой основе. Термины и определения по термической обработке. М.: Стандартинформ, 2016. 40 с.
3. Баев А.Р., Майоров А.Л., Тищенко М.А. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий // Литье и металлургия. 2010. № 4. С. 267—271.

4. Бида Г.В., Михеев М.Н., Костин В.Н. Определение размеров приставного электромагнита, предназначенного для неразрушающего контроля глубины и твердости поверхностно-упрочненных слоев // Дефектоскопия. 1984. № 8. С. 10—16.
5. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В., Ксенофонтов Д.Г. Патент № 2782884 Российская Федерация. Способ селективного контроля глубины и качества поверхностного упрочнения изделий из ферромагнитных материалов: № 2022109732; заявл. 12.04.2022. Опубликовано 07.11.2022; заявитель ИФМ УрО РАН. 1 с.: ил. Текст: непосредственный.
6. Сясько М.В., Соловьев И.П., Соломенчук П.В. Методика измерения толщины неэлектропроводящего покрытия на немагнитном электропроводящем основании с автоматическим учетом влияния удельной электропроводности основания // Дефектоскопия. 2023. № 7. С. 58—60.
7. Чернышев А.В. Выбор рабочей частоты вихретокового толщиномера с накладным преобразователем // Приборы и методы измерений. 2014. № 1 (8). С. 73—77.
8. Будалин О.Н., Кульков А.А., Козельская С.О., Щипцов В.С. Патент № 2616071 Российская федерация. Способ магнитоиндукционного измерения толщины диэлектрического покрытия и устройство для его осуществления: № 2016104680; заявл. 11.02.2016. Опубликовано 12.04.2017. Заявитель ОАО Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения. 1 с.: ил. Текст: непосредственный.
9. Чернышев А.В., Загорский И.Е., Шарандо В.И. Контроль толщины хромового покрытия на никелевом основании вихретоковым методом / Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Сборник статей 8-й Международной научно-технической конференции, Могилев, 29—30 сентября 2022 года. Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2022.
10. Критические точки стали: сайт. 2015. URL: <https://heattreatment-ru.com/kriticheskie-tochki-stali#> (дата обращения: 17.05.2024).
11. Самохоцкий А.И., Парфеновская Н.Г. Технология термической обработки металлов / Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1976. 311 с.
12. Kossovich E.L., Borodich F.M., Epshtein S.A., Galanov B.A., Minin M.G., Prosina V.A. Mechanical, structural and scaling properties of coals: depth-sensing indentation studies // Applied physics A. 2019. V. 125. Is. 3. DOI: 10.1007/s00339-018-2282-1
13. Brusnitsyna E.V., Grokhovsky V.I., Minin M.G. Nanoindentation of different structures within the metallic part of the Seymchan pallasite pmg // Meteoritics & Planetary Science. 2016. V. 51. P. A184—A184.

REFERENCES

1. Maisuradze M.V., Ryzhkov M.A., Belikov S.V., Kornienko O.Y., Karabanalov M.S., Zhilyakov A.Yu. Cementation, nitro-cementation and nitriding of steel products. Ekaterinburg: Ural University Publ., 2021. 102 p. (in Russian).
2. State standard. 33439—2015. Metal products, ferrous metals and alloys on iron-nickel and nickel-based. Heat treatment terms and definitions. Moscow: Standardinform, 2016. 40 p. (In Russian).
3. Baev A.R., Majorov A.I., Tishchenko M.A. Ultrasonic methods of analysis of the metal articles surface hardening // Foundry Production and Metallurgy. 2010. No. 4. P. 267—271.
4. Bida G.V., Mikheev M.N., Kostin V.N. Determination of dimensions of an attachable electromagnet designed for nondestructive testing of depth and hardness of surface-hardened layers // Soviet Journal of Nondestructive Testing. 1984. No. 8. P. 10—16.
5. Patent Russia, no. 2782884, 07.11.2022.
6. Syayako M.V., Soloviev I.P., Solomenchuk P.V. Method of measuring the thickness of non-electrically conductive coating on non-magnetic electrically conductive base with automatic consideration of the influence of specific conductivity of the substrate // Defektoskopiya. 2023. No. 7. P. 58—60.
7. Chernyshev A.V. Choosing of operating frequency of eddy current thickness meter with superimposed transducer // Devices and Methods of Measurements. 2014. No. 1. P. 73—78. (In Russian).
8. Patent Russia, no. 2616071, 12.04.2017.
9. Chernyshev A.V., Zagorskii I.E., Sharando V.I. Chromium plating thickness testing on nickel base by eddy current method. Modern methods and instruments of quality testing and diagnostics of objects' condition. Mogilev, 2022.
10. Critical points of steel. 2015. Available at: <https://heattreatment-ru.com/kriticheskie-tochki-stali#> (accessed 17.05.2024) (in Russian).
11. Samohotsky A.I., Parfenovskaya N.G. Technology of heat treatment of metals. M.: Mashinostroenie, 1976. 311 p. (In Russian).
12. Kossovich E.L., Borodich F.M., Epshtein S.A., Galanov B.A., Minin M.G., Prosina V.A. Mechanical, structural and scaling properties of coals: depth-sensing indentation studies // Applied physics A. 2019. V. 125. Is. 3. DOI: 10.1007/s00339-018-2282-1
13. Brusnitsyna E.V., Grokhovsky V.I., Minin M.G. Nanoindentation of different structures within the metallic part of the Seymchan pallasite pmg // Meteoritics & Planetary Science. 2016. V. 51. P. A184—A184.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В АСИММЕТРИЧНОМ ЦИКЛЕ «КОЭРЦИТИВНЫЙ ВОЗВРАТ—НАМАГНИЧИВАНИЕ»

© 2024 г. Д.Г. Ксенофонтов^{1,*}, О.Н. Василенко^{1,**}, В.Н. Костин¹, Н.П. Лукиных¹

¹Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18
E-mail: *ksenofontov@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru

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

Индукция коэрцитивного возврата и индукция инверсии коэрцитивной силы могут применяться для проведения магнитной структуроскопии. На примере задачи контроля термообработки стали 20H2M показано влияние скорости перемагничивания и разрешающей способности источника тока на величину и характер получаемых зависимостей. Установлено, что большая скорость перемагничивания и большой шаг установки тока являются мешающими факторами, затрудняющими воспроизведение результатов измерений и получение достоверных зависимостей.

Ключевые слова: индукция коэрцитивного возврата, индукция возврата от коэрцитивной силы, скорость перемагничивания, источник тока.

DETERMINING THE FACTORS INFLUENCING THE REPRODUCIBILITY OF MEASUREMENTS IN THE ASYMMETRIC CYCLE «COERCIVE RETURN—MAGNETIZATION»

© 2024 D.G. Ksenofontov^{1,*}, O.N. Vasilenko^{1,**}, V.N. Kostin¹, N.P. Lukinikh¹

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Russia 620108 Yekaterinburg, S. Kovalevskaya Street, 18
E-mail: *ksenofontov@imp.uran.ru; **vasilenko@imp.uran.ru

The induction of coercive return and induction of coercive force inversion can be used for magnetic structure analysis. On the example of the problem of heat treatment testing of 20H2M steel, the influence of the remagnetization rate and the resolving power of the current source on the magnitude and character of the obtained dependences is shown. It is established that a high rate of remagnetization and a large step of current setting are interfering factors complicating the reproduction of measurement results and obtaining reliable dependences.

Keywords: induction of coercive return, induction of coercive force inversion, magnetization rate, current source.

DOI: 10.31857/S0130308224080074

ВВЕДЕНИЕ

Параметры, измеряемые в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание» (рис. 1), такие как индукция коэрцитивного возврата (индукция возврата от коэрцитивной силы) B_{H_c} , индукция инверсии коэрцитивной силы B_{+H_c} и другие, являются перспективными для проведения магнитной структуроскопии [1].

Индукция коэрцитивного возврата пропорциональна релаксационной индукции, при этом несколько проще для измерения [2]. Измерение B_{H_c} может быть легко реализуемо в рамках коэрцитиметров по размагничивающему току. В таких коэрцитиметрах для измерения индукции используются датчики магнитного поля с малыми диапазонами измерений, так как они применяются в качестве «ноль-индикаторов». Также в таких коэрцитиметрах используются источники размагничивающего тока малой величины. За счет этих факторов размагничивание происходит с высокой точностью и повторяемостью, и B_{H_c} измеряется с высоким разрешением.

В многопараметровых системах, измеряющих всю петлю магнитного гистерезиса, для измерения индукции используются датчики с широким диапазоном измерений. При этом источник тока также имеют широкий диапазон устанавливаемых значений. Эти факторы могут влиять на точность установки 0 по индукции, а соответственно и на результаты измерений B_{H_c} и B_{+H_c} .

Определение статических магнитных характеристик может производиться при постоянной скорости изменения приложенного магнитного поля или при постоянной скорости изменения индукции [3]. Скорость перемагничивания влияет на результат измерений статических магнитных характеристик [4], однако этот параметр указывается не во всех работах [1]. Известно, что в зависимости от размера контролируемого объекта необходимо выбирать различное время

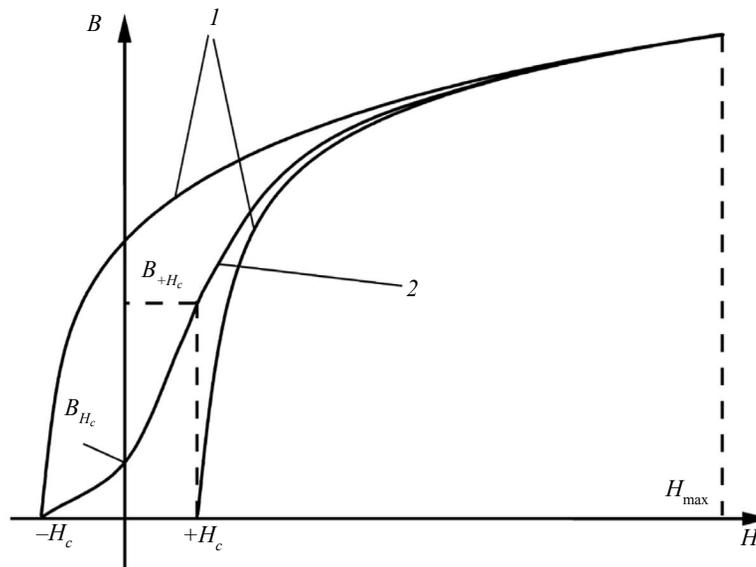


Рис. 1. Часть петли магнитного гистерезиса (1), кривая возврата от коэрцитивной силы (2) и соответствующие измеряемые параметры.

перемагничивания [5]. В настоящее время нет устоявшегося критерия выбора скорости перемагничивания.

Целью работы была оценка влияния скорости перемагничивания и разрешающей способности источника тока на воспроизводимость значений индукции коэрцитивного возврата B_{H_c} при измерениях в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание».

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАЗЦЫ

С помощью АПС DIUS 1-21M [6] были проведены измерения предельных петель магнитного гистерезиса и в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание». На основании измеренной петли магнитного гистерезиса рассчитывался ток, требуемый для приведения образца в размагниченное состояние. Это значение использовалось в последующем измерении в асимметричном цикле. В аппаратно-программной системе использовались источники тока с различной разрешающей способностью: 34,5 и 1,5 мА. Перемагничивание производилось с постоянной скоростью изменения тока в катушках электромагнита, которая задавалась установкой длительности цикла перемагничивания 10, 30 и 60 с. Максимальная напряженность магнитного поля H_{max} в образцах составляла 450 А/см, соответственно скорость перемагничивания составляла 180, 60 и 30 (А/см)/с.

Таблица 1

Режимы температурной обработки образцов из стали 20H2M

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура отпуска, °С	-	150	200	250	300	350	430	460	500	550	600	650

Использовались образцы из конструкционной легированной стали 20H2M размером 10×10×65 мм с температурой закалки 860 °С и различной температурой отпуска, свойства которых указаны в табл. 1. Выбор именно этой стали обоснован наличием более ранних исследований [1], в которых оценивались B_{H_c} и B_{+H_c} , и были определены зависимости этих параметров от температуры отпуска. Проводилось по 8 измерений на каждом образце, определялись значения B_{H_c} и B_{+H_c} , рассчитывалось значение среднеквадратичного отклонения. Для оценки точности установки размагниченного состояния в асимметричном цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание» измерялось минимальное значение магнитной индукции B_{min} . Значения B_{H_c} и B_{+H_c} определялись с учетом B_{min} .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате измерений были получены зависимости B_{H_c} , B_{+H_c} и B_{\min} от температуры отпуска (рис. 2). Результаты измерений при скорости перемагничивания 30 (А/см)/с не представлены, так как совпадают с результатами измерений при скорости 60 (А/см)/с. Зависимости, полученные при длительности цикла перемагничивания 30 (А/см)/с и 60 (А/см)/с, качественно совпадают с результатами, полученными ранее [1].

Зависимости B_{H_c} и B_{+H_c} , полученные при скорости перемагничивания 180 (А/см)/с и с использованием источника тока, имеющим шаг 34,5 мА, отличаются от полученных ранее и от полученных в этом исследовании при других условиях. Эти зависимости немонотонные, также для образца с температурой отпуска 650 °С наблюдается большие значения среднеквадратичного отклонения измеряемых параметров. Для этого образца измерения имеют разные значения тока размагничивания в точке, соответствующей коэрцитивной силе. При этом эти значения тока являются двумя соседними возможными значениями.

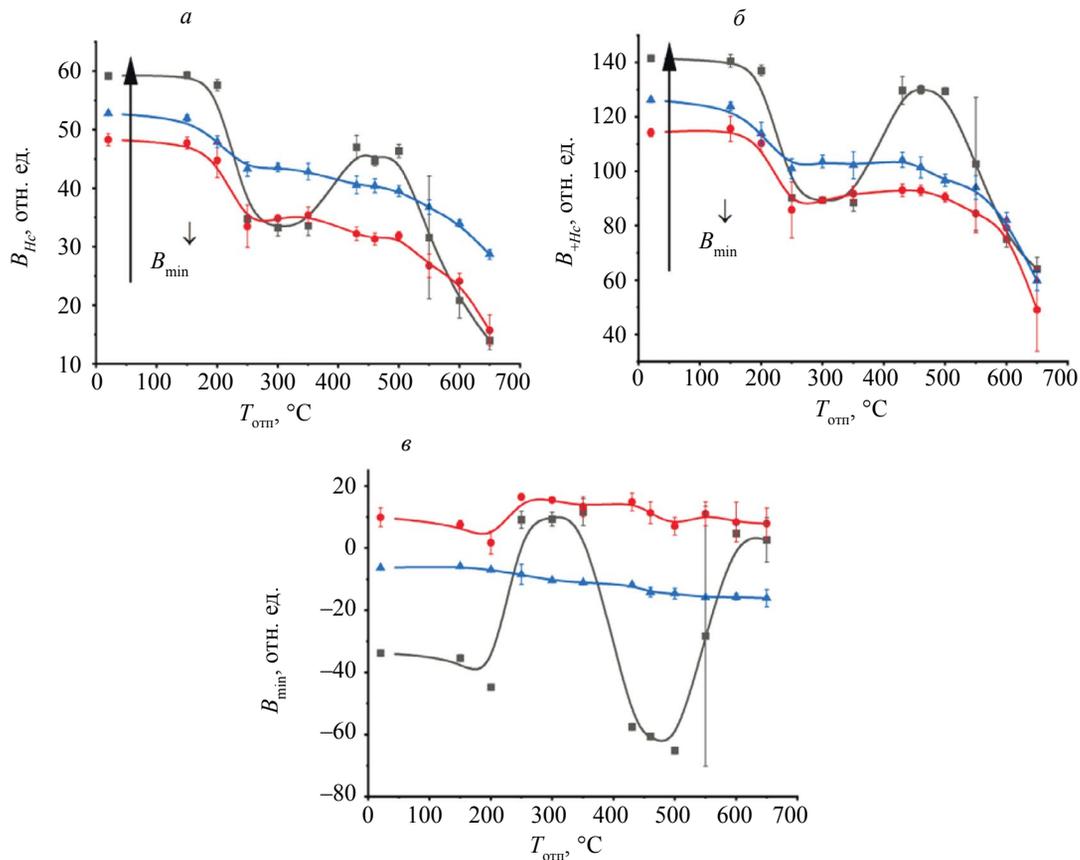


Рис. 2. Зависимости индукции коэрцитивного возврата B_{H_c} (а), индукции инверсии коэрцитивной силы B_{+H_c} (б) и минимальной магнитной индукции B_{\min} в цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание» (в) от температуры отпуска для стали 20H2M для различных режимов перемагничивания: (■) 180 (А/см)/с, (●) 60 (А/см)/с, (▲) 60 (А/см)/с с разрешением источника тока 1,5 мА.

Можно видеть, что с увеличением скорости перемагничивания величина B_{\min} уменьшается, то есть становится дальше от 0. Причиной такого изменения может быть магнитное последствие, вызванное действием вихревых токов и перераспределением намагниченности в составной магнитной цепи. Альтернативная гипотеза состоит в том, что причиной наблюдаемого эффекта является фильтр низких частот аппаратно-программной системы. Для выявления действительной причины требуется дальнейшее исследование. При этом, с уменьшением B_{\min} измеряемые значения B_{H_c} и B_{+H_c} увеличиваются, т.е. режим измерений напрямую влияет на результат.

Также наблюдается, что с уменьшением разрешения источника тока с 34,5 мА до 1,5 мА при скорости перемагничивания 60 (А/см)/с воспроизводимость результатов значительно улучшается: среднеквадратичное отклонение B_{\min} уменьшается, зависимость B_{\min} от темпера-

туры начинает носить линейный характер, максимальное среднеквадратичное отклонение B_{H_c} и B_{+H_c} также уменьшается.

В наиболее благоприятном режиме измерений (скорость перемагничивания 60 (А/см)/с, разрешение источника тока 1,5 мА) величина B_{\min} отлична от 0 и линейно уменьшается с увеличением температуры отпуска. При этом увеличивается величина дифференциальной магнитной проницаемости в точке, соответствующей коэрцитивной силе. Предположительно, это приводит к увеличению плотности силы вихревых токов, а значит и к увеличению магнитного последствия. В дальнейшем возможно введение поправки при расчете тока размагничивания с учетом дифференциальной магнитной проницаемости, рассчитанной по предварительно измеренной петле магнитного гистерезиса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что воспроизводимость измерений в цикле «коэрцитивный возврат—намагничивание», определяемая по среднеквадратичному отклонению и характеру получаемых зависимостей, напрямую зависит от таких факторов, как скорость перемагничивания, зависящая от длительности цикла измерений, и разрешение источника тока.

При комбинации мешающих факторов в виде высокой скорости перемагничивания и большой величины минимального изменения тока характер наблюдаемых зависимостей может значительно изменяться, что может привести к неверной интерпретации результатов, полученных с помощью различного оборудования и при различных условиях.

Возможно дальнейшее повышение точности измерений индукции коэрцитивного возврата и индукции инверсии коэрцитивной силы с помощью многопараметровых аппаратно-программных систем за счет программного учета влияния дифференциальной магнитной проницаемости в точке коэрцитивной силы.

В дальнейшем необходимо ввести критерий для определения оптимальной скорости перемагничивания, определить зависимость этого параметра от геометрических размеров и формы элементов составной магнитной цепи.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костин В.Н., Василенко О.Н., Сандомирский С.Г. Структурная чувствительность параметров несимметричного цикла «коэрцитивный возврат—намагничивание» термообработанных низкоуглеродистых сталей // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 5—15.
2. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Измерение магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий при квазистатическом перемагничивании // Неразрушающий контроль и диагностика. 2011. № 4. С. 3—34.
3. ASTM A773/A773M-21 Standard Test Method for Direct Current Magnetic Properties of Low Coercivity Magnetic Materials Using Hysteresigraphs.
4. Вонсовский С.В. Магнетизм. Москва: Гл. редакция физ.-мат. литературы издательства «Наука», 1971. 1032 с.
5. IEC 60404-4:1995 Magnetic materials—Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of iron and steel.
6. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В. Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 47—53.

REFERENCES

1. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Sandomirskii S.G. Structural Sensitivity of the Parameters of Asymmetric «Coercive Return—Magnetization» Cycle in Heat-Treated Low-Carbon Steels // Defektoskopiya. 2018. No. 1. P. 5—15.
2. Matyuk V.F., Osipov A.A. Measuring magnetic characteristics of soft magnetic materials and products in quasistatic remagnetization. Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika // Nondestructive Testing and Diagnostics. 2011. V. 4. P. 3—34. (In Russ.)
3. ASTM A773/A773M-21 Standard Test Method for Direct Current Magnetic Properties of Low Coercivity Magnetic Materials Using Hysteresigraphs.
4. Vonsovskii S.V. Magnetism. M.: Nauka, 1971 [in Russian]; NY: Wiley, 1974, in two volumes.
5. IEC 60404-4:1995 Magnetic materials—Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of iron and steel.
6. Kostin V.N., Vasilenko O.N., Byzov A.V. DIUS-1.15M Mobile Hardware—Software Structuroscopy System // Defektoskopiya. 2018. No. 9. P. 47—53.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО КОНТРОЛЯ ПОКРЫТИЙ ТРУБ В ПОТОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

© 2024 г. Д.И. Антонов^{1,*}, М.С. Степанова^{2,**}, А.С. Мусихин^{3,***}, В.А. Сясько^{3,****},
К.А. Томский^{4,*****}

¹ВНИИМ им. Менделеева, Россия 190005 Санкт-Петербург, Московский пр-т, 19
²Санкт-Петербургский Горный университет, Россия 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., 2
³ООО «КОНСТАНТА», Россия 198095 Санкт-Петербург, Огородный пер., 21, литер А
⁴ООО «НТП «ТКА», Россия 192289 Санкт-Петербург, Грузовой проезд, 33, корп.1, литер Б
E-mail: *antonovden99@mail.ru; **stepanovamariya11.02.01@gmail.com;
musihinaleksei@mail.ru; *9334343@gmail.com; *****tka46@mail.ru

Поступила в редакцию 24.05.2024; после доработки 20.06.2024

Принята к публикации 21.06.2024

Рассмотрены вопросы обеспечения достоверности автоматизированного электроискрового контроля сплошности диэлектрических покрытий металлических труб диаметром до 1500 мм в условиях поточного производства. Выполнено моделирование системы генератор импульсного испытательного напряжения—электрод—диэлектрическое покрытие—металлическое основание. Проведены экспериментальные исследования нагрузочной способности и стабильности испытательного напряжения электроискрового дефектоскопа Корона 2.2 с применением усовершенствованного узла генерации при высоких емкостных нагрузках.

Ключевые слова: электроискровой дефектоскоп, поточное производство, автоматизированная система контроля, сплошность, испытательное напряжение.

ENSURING THE RELIABILITY OF AUTOMATED PULSE ELECTRIC SPARK CONTROL OF PIPE COATINGS IN IN-LINE PRODUCTION

© 2024 D.I. Antonov^{1,*}, M.S. Stepanova^{2,**}, A.S. Musikhin^{3,***}, V.A. Syasko^{3,****},
K.A. Tomsky^{4,*****}

¹D.I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), 190005 St. Petersburg, Moskovsky Ave, 19
²Saint-Peterburg Mining University, 199106 St. Petersburg, 21st Line, 2
³LLC «KONSTANTA», 198095 St. Petersburg, Ogorodny Lane, 21
⁴TKA Scientific Instruments LLC, 192289, St. Petersburg, Freight passage, 33
E-mail: *antonovden99@mail.ru; **stepanovamariya11.02.01@gmail.com;
musihinaleksei@mail.ru; *9334343@gmail.com; *****tka46@mail.ru

The issues of ensuring the reliability of automated electric spark testing of the continuity of dielectric coatings on metal pipes with diameters up to 1.5 meters in the context of in-line manufacturing are addressed. A simulation of the “high-voltage pulse source – electrode – dielectric coating – metal substrate” system has been conducted. Experimental studies have been conducted to evaluate the load capacity and voltage stability of the Corona 2.2 holiday detector using an improved generator at high capacitive loads.

Keywords: holiday detector, in-line production, automated control system, continuity, test voltage.

DOI: 10.31857/S0130308224080085

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время автоматизированный контроль сплошности покрытий металлических труб, с учетом обеспечения требований по электробезопасности, регламентируется проводить с использованием импульсного электроискрового метода неразрушающего контроля (НК) [1]. Однако при его реализации в поточном трубном производстве присутствует ряд факторов, оказывающих существенное влияние на производительность и достоверность контроля. В частности, повышенная электрическая емкость C_n системы электрод—диэлектрическое покрытие—металлическое основание обуславливает дополнительные требования по обеспечению выходной мощности генератора испытательного напряжения U_n и его стабильности при необходимости согласовывания скорости перемещения трубы с частотой следования импульсов. Выполненное моделирование процесса формирования импульсов испытательного напряжения в системе генератор импульсного испытательного напряжения—электрод—диэлектрическое покрытие—металлическое основание позволило исследовать влияние параметров объекта контроля — металлической трубы диаметром D до 1500 мм с защитным диэлектрическим покры-

тием толщиной d_n до 6 мм, перемещающейся со скоростью 0,3 м/с, на достоверность НК и стабильность высокого напряжения.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для обеспечения стабильности импульса U_n , а также обеспечения достоверности контроля сплошности труб диаметром D до 1500 мм при C_n до 800 пФ (рис. 1), было проведено моделирование электрической эквивалентной схемы в программном пакете LTspice и предложено программно-аппаратное решение генератора (рис. 2), позволяющее обеспечить требуемое стандартами [3, 4] испытательное напряжение U_n на электродах.

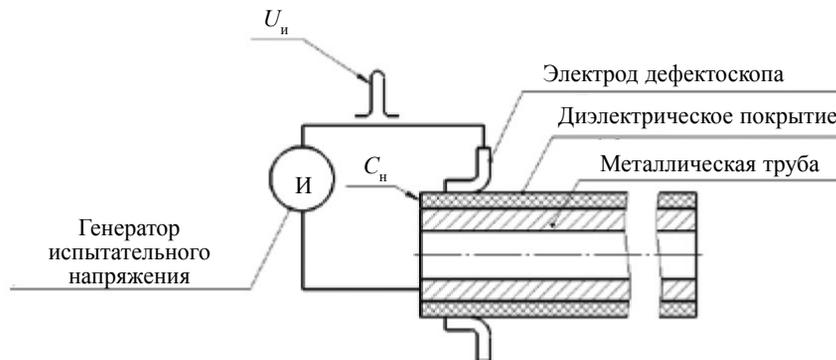


Рис. 1. Схематическое изображение металлической трубы с емкостной нагрузкой: И — генератор испытательного напряжения.

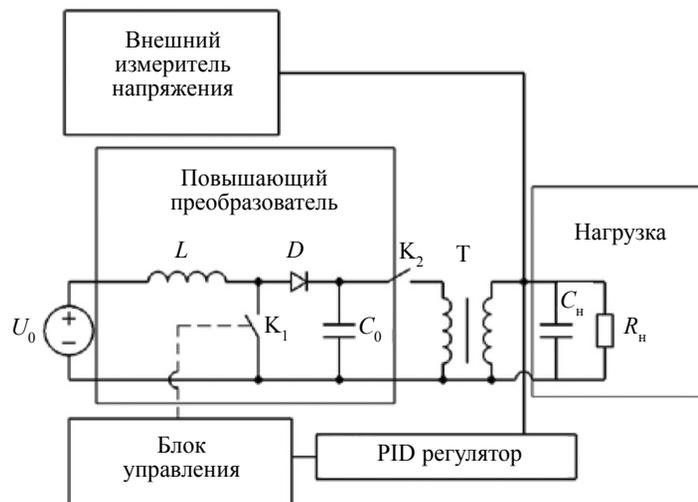


Рис. 2. Структурная схема генератора U_n : L — индуктивность; D — диод; K_1, K_2 — ключи; C_0 — накопительный конденсатор; T — повышающий трансформатор.

Для формирования импульса U_n повышающий преобразователь генерирует постоянное напряжение на емкости C_0 , равное $k \cdot U_0$, где k — коэффициент преобразования. При разряде емкости C_0 через ключ K_2 и первичную обмотку трансформатора T на вторичной обмотке трансформатора формируется импульс испытательного напряжения U_n , амплитуда которого зависит от параметров трансформатора T и эквивалентных нагрузочной емкости C_n и сопротивления R_n покрытия. Регулировка напряжения на электроде при изменении C_n и R_n в процессе контроля осуществляется с помощью программного пропорционально-интегрально-дифференцирующего (PID) регулятора, формирующего корректирующее воздействие на повышающий преобразователь. Внешний измеритель напряжения осуществляет контроль стабильности U_n в допустимом диапазоне (абсолютная допустимая погрешность задания и поддержания U_n не более $\pm 5\%$).

На основе представленной схемы было проведено моделирование системы «генератор импульсов испытательного напряжения — емкостная нагрузка» с C_n до 800 пФ (рис. 3). Рассмотрены различные варианты схемы генератора: двуканальная накачка, двухтрансформаторный высоковольтный (ВВ) блок и их комбинация. Подключение соответствующих элементов схемы (рис. 4) параллельно приводит к повышению испытательного напряжения и увеличению токопотребления при подаче на нагрузку.

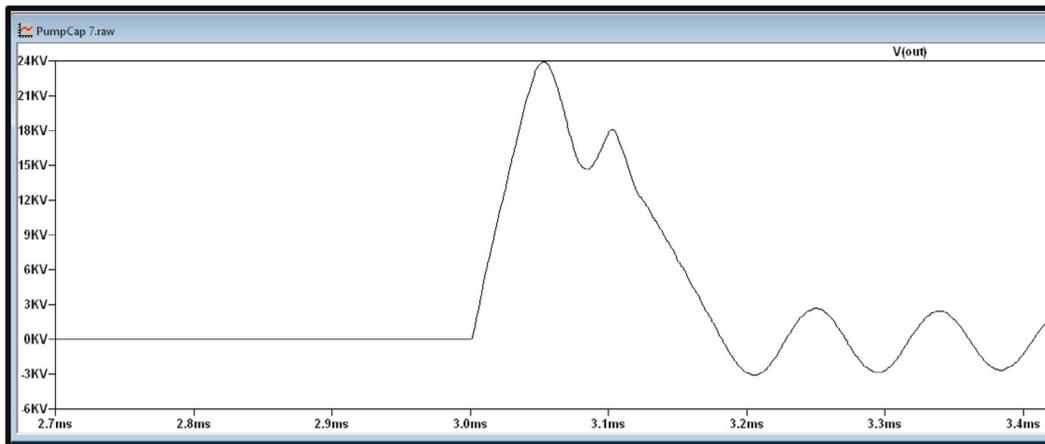


Рис. 3. Вид импульса U_n , полученного в результате моделирования в программном пакете LTSpice.

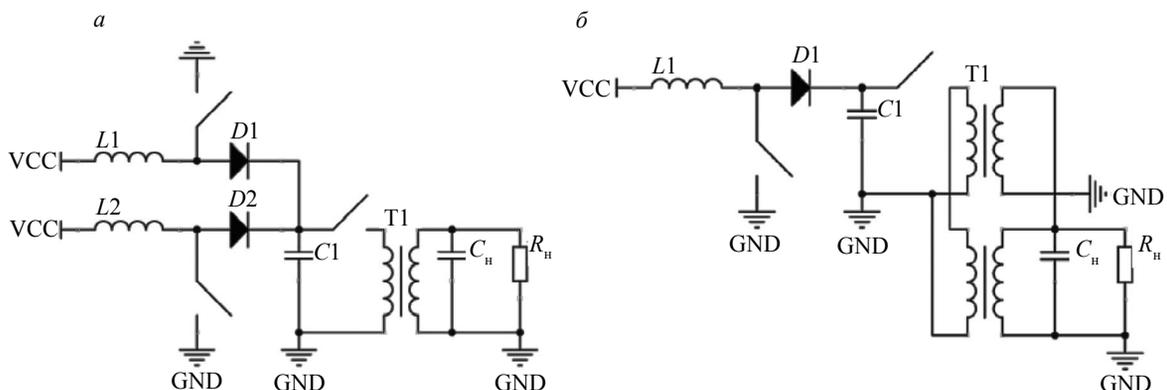


Рис. 4. Структурная схема генератора импульсов испытательного напряжения: двуканальная накачка (а); двухтрансформаторный ВВ блок (б).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе оптимизации схемы генератора импульсов испытательного напряжения обеспечено увеличение амплитуды его максимального значения во всем диапазоне C_n , соответствующих диапазону диаметров D контролируемых труб и толщин d_n покрытий по сравнению с существующей реализацией прибора Корона 2.2 (рис. 5) при обеспечении требуемой стабильности U_n .

При экспериментальных исследованиях установлено, что амплитуда максимального обеспечиваемого испытательного напряжения U_n также зависит от толщины покрытия. На рис. 6 приведены экспериментальные зависимости $U_n(d_n)$ для типовых значений C_n . Рост амплитуды максимального обеспечиваемого испытательного напряжения с увеличением толщины покрытия обусловлен повышением активного сопротивления системы электрод—покрытие—труба и снижением тока утечки соответственно.

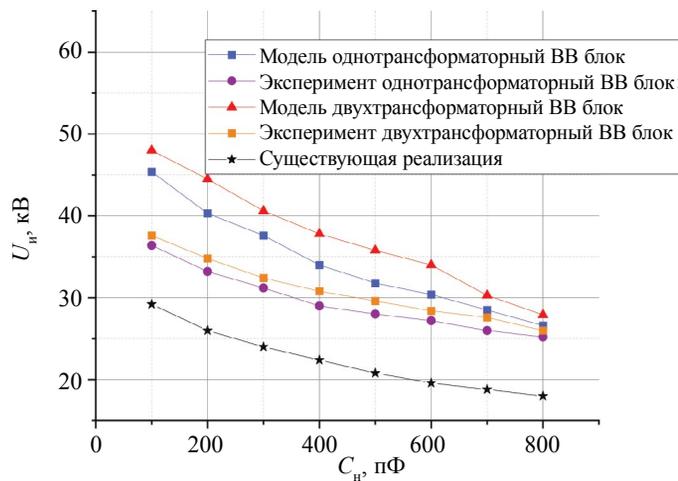


Рис. 5. Нагрузочная способность: зависимость максимального обеспечиваемого испытательного напряжения $U_{и}$ от емкости нагрузки $C_{н}$ при $d_{н} = 2$ мм.

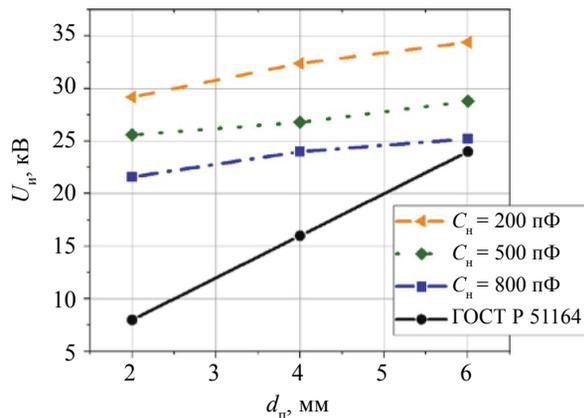


Рис. 6. Зависимость амплитуды максимального обеспечиваемого испытательного напряжения $U_{и}$ от толщины покрытия для различных фиксированных емкостей $C_{н}$.

ВЫВОДЫ

Результаты моделирования переходных процессов в системе генератор импульсного испытательного напряжения—электрод—диэлектрическое покрытие—металлическое основание, подтвержденные экспериментальными исследованиями, позволяют производить расчет параметров схемы электроискрового дефектоскопа и формируемого испытательного напряжения. Показано, что амплитуда максимального обеспечиваемого испытательного напряжения $U_{и}$ для труб большого диаметра также зависит от толщины покрытия, определяющего величину токов утечки, что до настоящего времени не учитывалось при разработке методик контроля.

Использование предложенных аппаратных и программных решений позволяет обеспечить амплитуду испытательного напряжения $U_{и}$, необходимую для контроля сплошности покрытий толщиной до 6 мм на металлических трубах диаметром до 1500 мм, и выявление сквозных и несквозных дефектов покрытий при скорости движения объекта контроля до 0,3 м/с использованием традиционно применяемых кольцевых электродов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль / Справочник. В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль. Вавилов В.П. Кн. 2: Электрический контроль. Подмастерьев К.В., Соснин Ф.Р., Корндорф С.Ф., Ногачева Т.Н., Пахолкин Е.В., Бондарева Л.А., Мужижкий В.Ф. М.: Машиностроение, 2004. 679 с.: ил. и цветная вкладка 24 с.
2. Мусихин А.С., Сясько В.А.. Электроискровой контроль сплошности защитных лакокрасочных покрытий// NDT World. 2018. V. 21. No. 2. P. 42—45. DOI: 10.12737//

3. ГОСТ Р 51164—98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Госстандарт России, 1998.
4. ГОСТ 34395—2018 Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях. М.: Стандартинформ, 2018. 10 с.

REFERENCES

1. Non-destructive testing: Reference book: In 7 t. Under the general ed. of V.V. Klyuev. T. 5: In 2 books. Book 1: Thermal control. Vavilov V.P. Book 2: Electrical control. Podmasteryev K.V., Sosnin F.R., Korndorf S.F., Nogacheva T.N., Pakholkin E.V., Bondareva L.A., Muzitsky V.F. М.: Mashinostroenie, 2004. 679 p.: ill. and color tab. 24 p.
2. *Musikhin. A.S., Syasko V.A.* Electric spark control of the continuity of protective coatings // NDTWorld. 2018. 21st century. No. 2. P. 42—45. DOI: 10.12737//
3. ГОСТ Р 51164—98. Steel pipe mains. General requirements for corrosion protection. Moscow: Gosstandart of Russia, 1998.
4. ГОСТ 34395—2018 Paint and varnish materials. An electric spark method for monitoring the continuity of dielectric coatings on conductive substrates. Moscow: Standartinform, 2018. 10 p.

Уважаемые коллеги!

16—17 октября 2024 года в Пекине пройдет **Первое Российско-китайское совещание по обмену опытом в области НК**.

Совещание пройдет по инициативе РОНКТД и ChSNDT в Пекинском международном конференц-центре.

Всем желающим принять участие в Совещании необходимо:

- подать заявку на участие;
- предоставить тезисы докладов,
- предоставить сведения о докладчике;
- предоставить сведения о представляемой компании.

Напоминаем, что российские компании могут представить свою продукцию на **Третьем Всемирном конгрессе по мониторингу состояния (WCCM 2024)**, который пройдет с 15 по 18 октября 2024 года в Пекинском международном конференц-центре.

Для участия в «WCCM 2024» необходимо пройти регистрацию на сайте www.wccm2021.com

Там же вы найдете информацию о конфигурации и стоимости стендов, а также о других организационных вопросах мероприятия.

Компании, участвующие в выставке «**WCCM 2024**» со стендом, имеют право направить одного участника Совещания без организационного взноса.

Мероприятие международное, поэтому планируйте больше времени на организацию!