

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА АКУСТИЧЕСКИМ АМПЛИТУДНО-ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ

© 2023 г. О.П. Богдан¹, О.В. Муравьева^{1, 2, *}, А.В. Блинова¹, Д.В. Злобин¹

¹ *Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Россия 426069 Ижевск, ул. Студенческая, 7*

² *Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Россия 426067 Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
E-mail: *pmkk@istu.ru*

Поступила в редакцию 20.06.2023; после доработки 30.06.2023

Принята к публикации 30.06.2023

Представлены результаты исследования чувствительности акустического метода контроля плотности образцов из терморасширенного графита, основанного на регистрации изменения амплитуды прошедшего сигнала сквозь образец, обусловленное изменением плотности, показавшие, что предельная чувствительность метода соизмерима с погрешностью измерения плотности прямым весовым методом и массы составила 26 кг/м³ и 0,02 г соответственно. Проведена оценка неравномерности распределения плотности по площади образцов из ТРГ разной толщины, при этом отклонение амплитуды прошедшего сигнала сквозь образец, пропорциональное отклонению плотности, для некоторых листов достигло до 50 %, для матов — 30 %, а наименьшее не превысило 10 %. В процессе сканирования выявлена обратно пропорциональная зависимость амплитуды прошедшего акустического сигнала от средней плотности образцов, наиболее выраженная для малых толщин матов и листов ТРГ.

Ключевые слова: терморасширенный графит, акустический амплитудно-теневой метод, плотность, чувствительность, амплитуда прошедшего сигнала.

DOI: 10.31857/S0130308223080031, **EDN:** DYTIAГ

ВВЕДЕНИЕ

Графит и различные композиционные материалы на его основе, включая интеркалированные соединения графита, широко используются в различных областях науки, техники и промышленности [1]. Большое распространение среди данных материалов получил терморасширенный графит (ТРГ), представляющий собой углеродный материал с пористой структурой [2], благодаря которой обладает высокими физическими и химическими свойствами. Основные характеристики ТРГ включают высокопористую структуру, очень малый вес, высокие механические свойства, регулируемую теплопроводность [2—5], высокую электропроводность, высокую удельную емкость [6], эрозионную стойкость и низкую стоимость.

В настоящее время разработано большое количество технологий изготовления ТРГ, суть которых сводится к следующему: ТРГ получают посредством интеркалирования графита с последующим термовоздействием [2] и приданием конечной формы путем прессования или проката [7, 8] и при необходимости вырубке. Свойства ТРГ существенно зависят от технологии получения ТРГ, вводимых компонентов, методов интеркаляции [5] и терморасширения [9, 10]. Например, увеличение пористости ТРГ и механических свойств достигается путем введения различных органических и неорганических добавок [5], изменения теплостойкости, электропроводности и сорбционных свойств можно обеспечить в результате интеркалирования различными кислотами [3, 5, 7, 11—13], добиться магнитных свойств возможно присадкой к ТРГ ферромагнитного металла [14].

Благодаря технологии получения, свойств и исходным материалам ТРГ создают предпосылки для разработки разнообразных многофункциональных материалов [5, 11—16].

Широкое использование материалы из ТРГ получили в качестве огнезащитного [17] и теплоизоляционного средства, радиационного [18] и теплоотражающего экрана [5] в атомной и химической промышленности в условиях высоких температур. ТРГ используется в качестве высокоэффективных прокладок и уплотнителей для нефтегазодобывающей, нефтеперерабатывающей, химической промышленности и в гидросооружениях [4, 19]. Известны факты использования ТРГ в качестве катализаторов химических источников тока [7], проводящих наполнителей [20], топливных элементов [21], для очистки сточных и природных вод, в том числе при сорбции нефти и нефтепродуктов из водной среды [22].

В настоящее время активно ведутся исследования новых возможностей применения ТРГ в качестве модифицирующего компонента для улучшения свойств различных электродов [7, 23], анти-

фрикционных материалов на полимерной основе для узлов техники и технологического оборудования [24], порошковых сталей [16], в качестве материалов для производства электрохимических и суперконденсаторов [25].

На данный момент активно ведутся исследования морфологии структуры ТРГ, обусловленной технологией производства и оптимизацией режимов измельчения частиц [26], позволяющие повысить качество и минимизировать появление дефектов; исследуются теплостойкость и теплопроводность ТРГ и способы их варьирования [3, 5, 9, 12, 18, 20], термическая стабильность [21], коэффициент трения и износостойкость [27], возможность получения магнитных свойств [14].

Физико-механические свойства терморасширенного графита исследуются преимущественно разрушающими методами, требующими специализированного оборудования, длительного срока подготовки образцов и продолжительных испытаний особенно в условиях внешних воздействий (влажность, агрессивные среды, температурные воздействия и другие), а также методами дифференциального термического анализа и циклической вольтамперометрии [21]. Контроль и исследование структуры ТРГ проводят преимущественно методами рентгенофазового анализа, электронной и романовской спектроскопии [14]. Неразрушающий контроль состояния изделий из ТРГ в процессе эксплуатации проводят оптическими методами на базе оптоволоконных технологий [4].

Важным этапом производства изделий из ТРГ является контроль полотна в процессе его формирования, направленный на выявление основных дефектов проката, таких как разнотолщинность и разнотолтность по длине и ширине полотна, расслоения, пузыри воздуха [8, 28].

Одной из важнейших характеристик ТРГ является плотность, которая зависит от технологии получения и назначения изделия. Разнотолтность — основной дефект, возникающий при прокатке полотна из ТРГ, как в направлении прокатки, так и по ширине листа [8, 28—30].

Для контроля плотности ТРГ при выборочном контроле используется прямой весовой метод, не позволяющий оценить ее распределение по площади образца. Радиочастотный метод оценки разнотолтности (Патент № 2257342) обладает недостаточной чувствительностью и разрешающей способностью. Использование радиационного метода [31] ограничено требованиями безопасности.

Перспективные варианты оценки структурного состояния материалов и изделий из пористых материалов, в том числе ТРГ, связаны с акустическими методами неразрушающего контроля, характеризующимися достаточно высокой чувствительностью, достоверностью и оперативностью с возможностью сплошного контроля [29, 30, 32, 33]. Ввиду того, что акустические свойства пористых материалов напрямую определяются их физико-механическими параметрами (плотность, упругость), использование акустических методов при контроле разнотолтности представляется наиболее целесообразным.

Цель работы: исследование чувствительности акустического метода для контроля плотности листов и матов образцов из терморасширенного графита и определения равномерности ее распределения по площади образца.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе исследованы образцы матов и листов из ТРГ, изготовленные на предприятии ООО «СИЛУР», различной толщины в количестве 9 партий различных диапазонов плотности в общем количестве 45 образцов размером 300×300 мм (табл. 1, табл. 2).

Таблица 1

Параметры исследуемых матов из ТРГ

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Средняя толщина h , мм / # партии	4,9 / #1						7,2 / #2					10,2 / #1					
Средняя плотность ρ , кг/м ³	34	38	53	66	78	90	112	122	126	133	148	135	151	154	165	171	180

Таблица 2

Параметры исследуемых листов из ТРГ

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Средняя толщина h , мм / # партии	1,5 / #1			1,0 / #2					0,8 / #3					
Средняя плотность ρ , кг/м ³	643	709	1147	802	1017	1139	1189	1363	764	895	1044	1084	1142	1509
№ п/п	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Средняя толщина h , мм / # партии	0,6 / #4						0,4 / #5				0,2 / #6			
Средняя плотность ρ , кг/м ³	722	911	1131	1196	1523	1543	1076	1225	1315	938	994	1034	1405	1468

Для исследований использована установка для контроля пористых материалов, входящая в состав УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий». Установка (Патент № 2796231) реализует амплитудно-теневой метод акустического контроля с использованием воздушных акустических преобразователей. Блок-схема и фото экспериментальной установки представлены на рис. 1 [32].

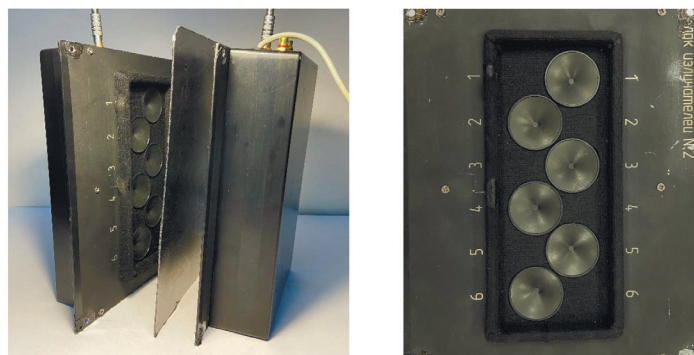
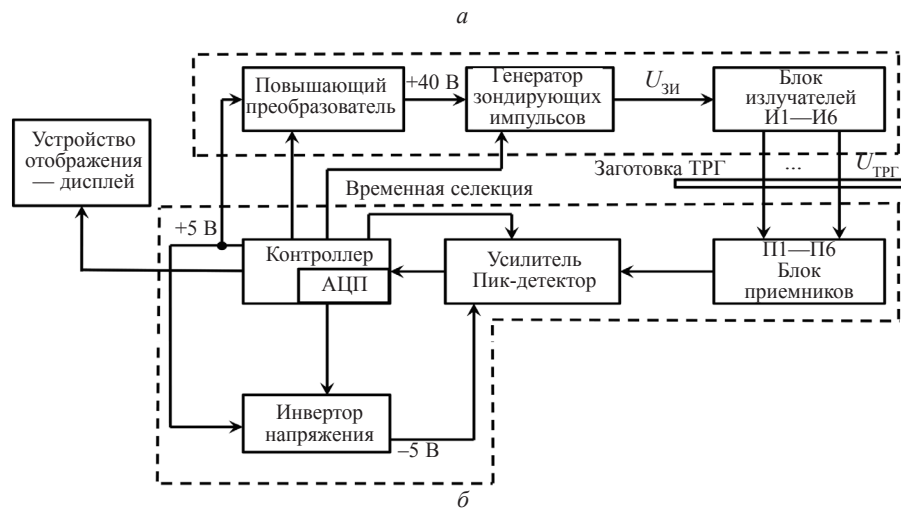


Рис. 1. Блок-схема (а) и фото (б) экспериментальной установки для исследований пористых материалов.

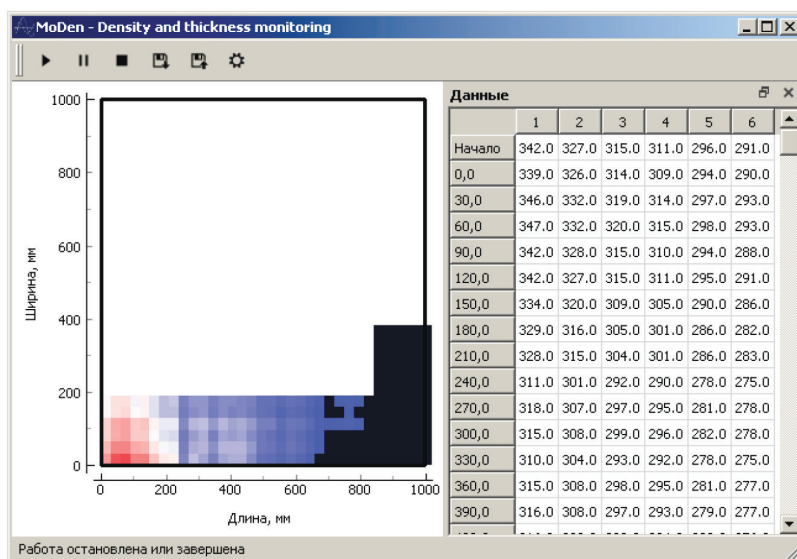


Рис. 2. Таблица и карта результатов контроля плотности пористых сред.

Генератор зондирующих импульсов служит для возбуждения блока низкочастотных акустических излучателей. Прошедшие через объект исследования импульсы акустической волны поступают на блок акустических приемников и усиливаются. Амплитуда сигнала, прошедшего через объект исследования, селектированная по времени, через пик-детектор передается на плату АЦП контроллера и далее на устройство отображения. Управление и обработка сигналов происходит с помощью микроконтроллера. Акустические пьезопреобразователи обеспечивают эффективное излучение и прием волн через воздушную среду за счет эффекта изгибных колебаний пьезопластин, согласование которых с низким импедансом объекта исследования через промежуточную воздушную среду — наилучшее. Специализированное программное обеспечение позволяет визуализировать распределение амплитуд сигналов, прошедших через объект как в табличном, так и в графическом виде (рис. 2).

Основные технические характеристики экспериментальной установки представлены в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики экспериментальной установки

Характеристика	Значение
Количество каналов	6
Рабочий диапазон частот	7—15 кГц
Амплитуда зондирующего импульса	15 В, 30 В, 45 В
Частота следования зондирующих импульсов	2 Гц
Коэффициент усиления	30—1000
Общий потребляемый ток	25 мА
АЦП	10 бит, частота дискретизации 10 кГц
Электропитание установки	+5 В
Пространственная разрешающая способность	50×50 мм
Погрешность измерения	± 3 отн.ед.

При прочих равных условиях метод наиболее чувствителен к изменению плотности и толщины объекта исследования и может быть позиционирован как метод оценки количества вещества (массы) объекта [29, 30, 32, 33].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В производственных условиях предприятия ООО «СИЛУР» проведена верификация разработанного метода посредством сравнения результатов оценки плотности на образце листа ТРГ с результатами контроля массы (плотности), полученными прямым методом взвешивания. С целью отстройки от коэффициента преобразования по каждому из каналов осуществлена предварительная калибровка по шести каналам на настроечном образце (НО) с известной толщиной h и плотностью, измеренной прямым методом. Настроечный образец, проконтролированный акустическим методом, в дальнейшем подвергался вырубке прозвучиваемых (контролируемых) участков с использованием металлического тонкостенного шаблона с диаметром, соответствующим апертуре акустических датчиков ($D = 34$ мм). Масса образцов после вырубки измерялась с помощью весов аналитических ГОСМЕТР ВЛ-64 с точностью определения $\Delta m = \pm 0,1$ мкг, толщина образцов — с помощью электронного штангенциркуля ШЦЦ-1-125 с точностью 10 мкм.

Плотность вырубки образца прямым методом определялась по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{4m}{\pi \cdot D^2 \cdot h}, \quad (1)$$

где m — масса вырубки образца; V — объем вырубки образца; D — диаметр вырубки образца; h — средняя толщина вырубленного образца.

В табл. 4 приведены результаты акустических измерений и прямых измерений плотности для настроечного образца и их пересчете в коэффициент преобразования канала.

Таблица 4

Результаты прямых измерений плотности и акустических измерений на настроечном образце

Номер канала	Толщина вырубки НО $h_{\text{НО}}$, мм	Масса вырубки образца $m_{\text{НО}}$, г	Плотность вырубки НО $\rho_{\text{НО}}$, кг/м ³	Амплитуда акустического сигнала $U_{\text{НО}}$, отн.ед.	Коэффициент преобразования канала, отн. ед. · м ³ /кг
1	1,05	0,8828	926	342	0,369
2	1,04	0,8846	936	377	0,403
3	1,04	0,8755	927	375	0,405
4	1,04	0,8765	928	383	0,413
5	1,05	0,8653	907	342	0,377
6	1,06	0,8682	902	395	0,438

Верификация методики проведена на листах ТРГ в диапазоне толщин от 1,03 до 1,08 мм и плотностей от 930 до 1130 кг/м³, определенных прямым методом взвешивания и акустическим методом. Строилась корреляция между изменением амплитуды ΔU прошедшего сигнала через исследуемый образец относительно амплитуды на настроечном образце $U_{\text{НО}}$ ($\Delta U = U - U_{\text{НО}}$) и изменением плотности $\Delta \rho$ (массы Δm) ($\Delta \rho = |\rho_{\text{НО}} - \rho|$, $\Delta m = |m_{\text{НО}} - m|$) по каждому из каналов.

Корреляцию между акустическими измерениями и прямыми измерениями изменения по плотности и изменения по массе относительно настроечного образца иллюстрирует калибровочная зависимость на рис. 3. Наблюдается однозначная линейная зависимость акустических измерений и измерений прямым весовым методом с коэффициентом корреляции R^2 , равным 0,94 для плотности и 0,95 для массы.

Погрешность измерения амплитуды не превышает ± 3 отн. ед. Погрешность определения плотности прямым весовым методом может быть рассчитана по формуле:

$$\delta \rho = \sqrt{\left(\frac{4\delta m}{\pi \cdot \bar{D}^2 \cdot \bar{h}}\right)^2 + \left(\frac{2\bar{m} \cdot \delta D}{\pi \cdot \bar{D}^3 \cdot \bar{h}}\right)^2 + \left(\frac{4\bar{m} \cdot \delta h}{\pi \cdot \bar{D}^2 \cdot \bar{h}^2}\right)^2}, \quad (2)$$

где δm — погрешность измерения массы вырубki образца; δD — погрешность измерения диаметра вырубki образца; δh — погрешность измерения толщины вырубki образца; $\bar{m}$ — средняя масса вырубki образца; $\bar{D}$ — средний диаметр вырубki образца; $\bar{h}$ — средняя толщина вырубki образца.

При погрешности определения толщины и диаметра образца $\delta D = \delta h = 10$ мкм и погрешности определения массы $\delta m = 0,1$ мкг, погрешность определения плотности составила $\delta \rho = \pm 19$ кг/м³.

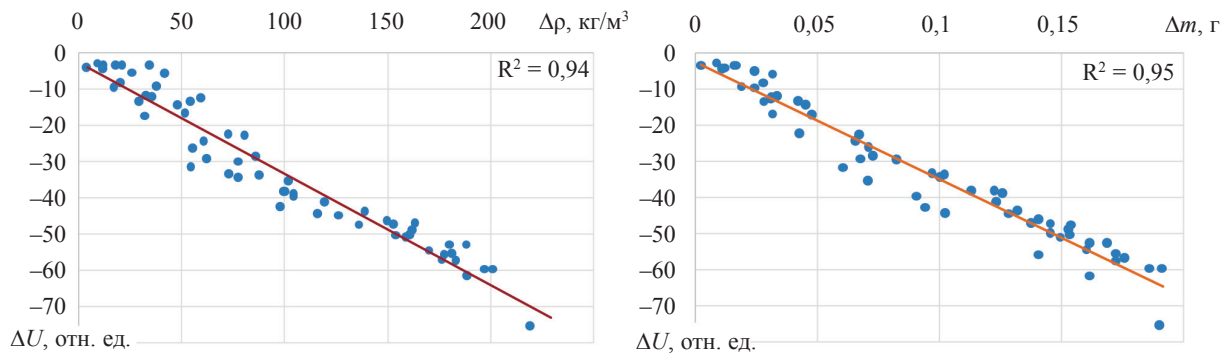


Рис. 3. Калибровочная зависимость изменения амплитуды прошедшего сигнала от изменения плотности.

С использованием калибровочной зависимости может быть оценена чувствительность акустического метода к изменению плотности S_ρ и к изменению массы S_m для листа данной толщины:

$$S_\rho = \frac{\Delta U}{\Delta \rho} = 0,34 \frac{\text{отн.ед.} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}, \quad S_m = \frac{\Delta U}{\Delta m} = 385 \frac{\text{отн.ед.}}{\text{г}}. \quad (3)$$

В предположении, что на фоне помех может уверенно выделяться сигнал, превышающий уровень шума в три раза (9 отн. ед.), метод позволяет оценить изменение плотности 26 кг/м³ и изменение массы 0,02 г, что соизмеримо с погрешностями их измерения прямым методом.

Следует отметить, что чувствительность метода, определяющая тангенс угла наклона калибровочной прямой, может меняться в зависимости от толщины и вида образца ТРГ, что объясняется сложностью и неоднозначностью физических процессов прохождения акустических волн через неоднородные пористые среды, связанных с коэффициентами пористости и извилистости пор, акустическими свойствами упругого пористого скелета, содержимого пор и давления в них [34].

Для оценки неравномерности распределения плотности (амплитуды акустического сигнала) по площади образца сканировались с использованием шестиканального устройства с расстановкой преобразователей согласно разметке в четырех положениях согласно схеме на рис. 4.

В опорной точке образца ТРГ с известной плотностью и толщиной проводилась калибровка 6 каналов установки.

В процессе сканирования регистрировалась амплитуда прошедшего сигнала U в каждой точке измерения и оценивалось отклонение ее от амплитуды опорного сигнала $U_{\text{оп}}$:

$$\Delta U = \frac{U - U_{\text{оп}}}{U_{\text{оп}}} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

В качестве примера на рис. 5 представлены результаты распределения по площади относительной амплитуды акустического сигнала для образцов листов с номинальной толщиной 0,2 и 0,6 мм различной плотности с наиболее выраженной и наименее выраженной неравномерностями.

Согласно рис. 5, образец листа ТРГ #24 ($h = 0,2$ мм, $\rho = 938$ кг/м³) (рис. 5а) является наиболее неравномерным по распределению плотности и имеет максимальное отклонение амплитуды прошедшего сигнала от опорного значения 37 % в положении I-1. Высокое отклонение по

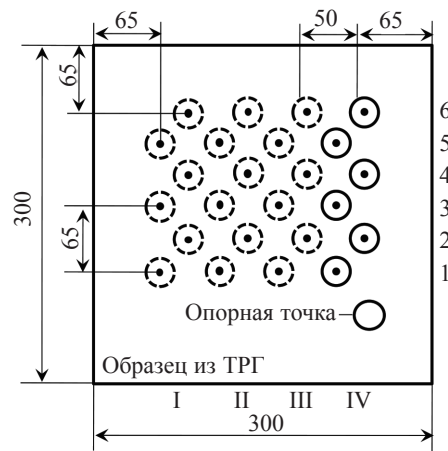


Рис. 4. Схема сканирования образцов ТРГ.

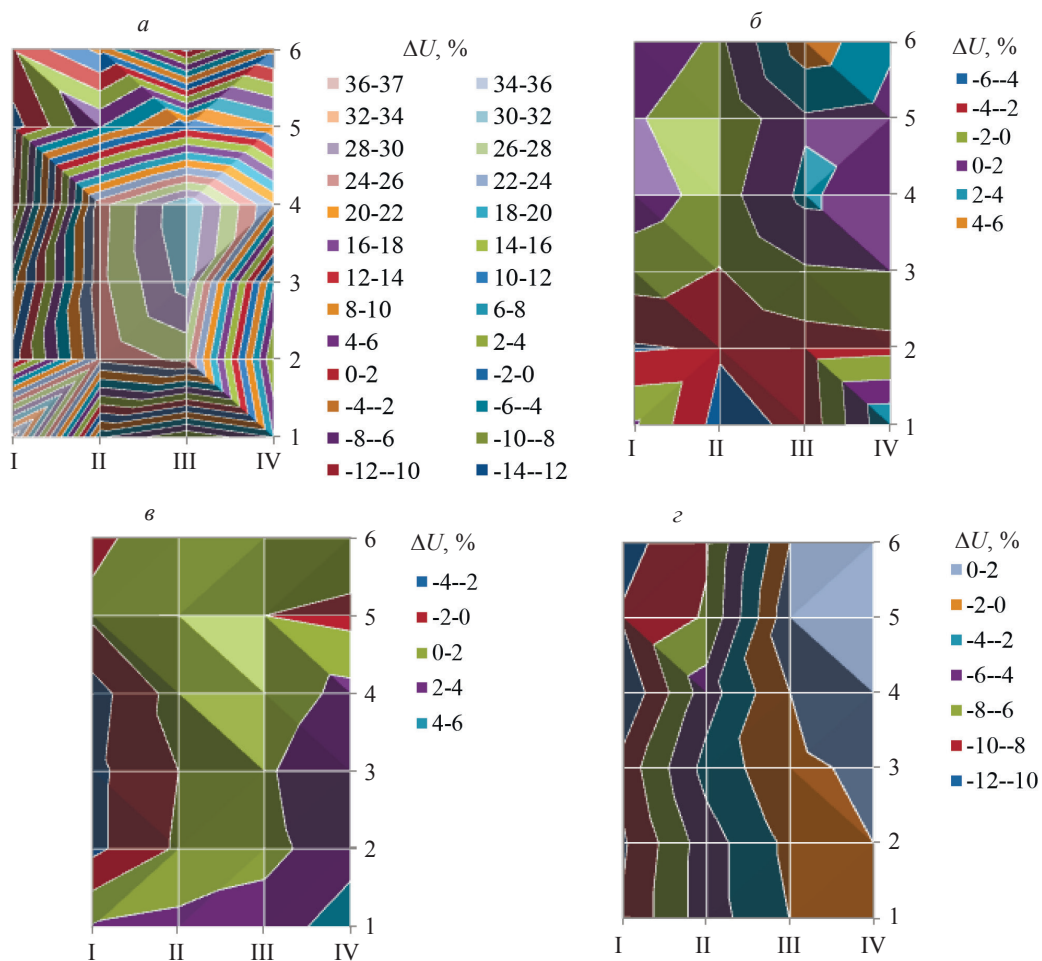


Рис. 5. Распределение относительной амплитуды сигнала по площади образцов листов ТРГ: образец #24 ($h = 0,2$ мм, $\rho = 938$ кг/м³) (а); образец #27 ($h = 0,2$ мм, $\rho = 1405$ кг/м³) (б); образец #15 ($h = 0,6$ мм, $\rho = 722$ кг/м³) (в); образец #18 ($h = 0,6$ мм, $\rho = 1196$ кг/м³) (г).

плотности наблюдается также по центру образца (положение III-3, III-4). При этом отклонение амплитуды прошедшего сигнала по площади образца от опорного значения лежит в диапазоне от -13 до 37 %. Наиболее равномерным по распределению плотности является образец листа ТРГ

#27 ($h = 0,2$ мм, $\rho = 1405$ кг/м³) (рис. 5б), для которого максимальное отклонение амплитуды прошедшего сигнала от опорного значения составило 5 % в положении III-6, при этом отсутствуют локальные ярко выраженные области существенного отклонения плотности. Для данного образца из ТРГ отклонение амплитуды прошедшего сигнала по его площади от опорного значения лежит в диапазоне от –5 до 5 %. Среди исследуемых образцов номинальной толщиной $h = 0,6$ мм, наибольшую неравномерность имеет образец листа ТРГ #18 (–12 % в положении I-4 — рис. 5г), наименьшую — образец #15 (5 % в положении I-5 — рис. 5е), при этом отклонение амплитуды прошедшего сигнала по площади образца от опорного значения составило от –3 до 5 % и от –12 до 2 % для образцов #15 и #18 соответственно.

Указанные закономерности связаны с технологией производства листов вследствие неравномерного распределения порошка по площади прокатного стана, износа прокатных роликов или нарушения скорости их вращения.

Для образцов матов ТРГ толщиной 10,2 мм результаты оценки неравномерности иллюстрирует рис. 6. Максимальное отклонение плотности от опорного значения –21 % имеет образец #13 плотностью 154 кг/м³ в положении III-6, при этом отклонение амплитуды прошедшего сигнала по площади образца от опорного значения составляет от –21 до 8 % (рис. 6а). Образец #17 плотностью 180 кг/м³ (рис. 6б) имеет максимальное отклонение плотности от опорного значения –5 % в положении IV-6, при этом отклонение амплитуды прошедшего сигнала по площади образца от опорного значения составляет от –5 до 4 %.

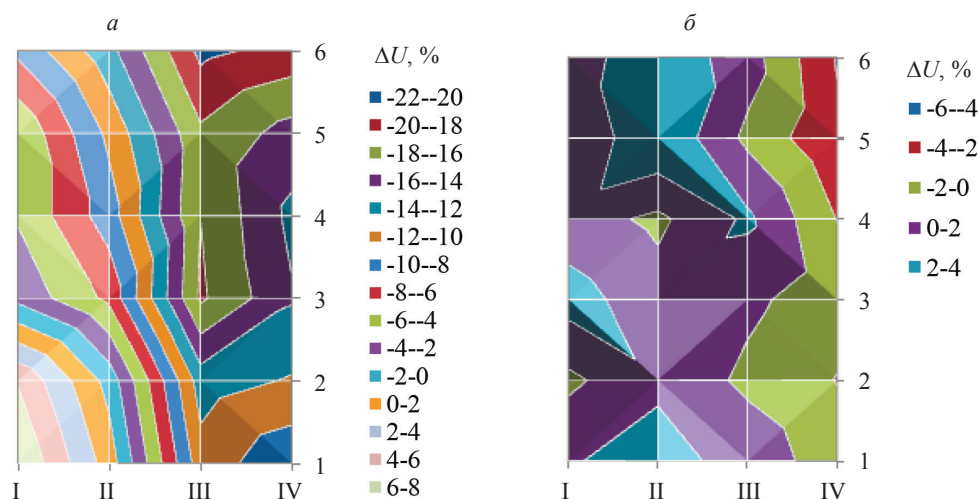


Рис. 6. Распределение относительной амплитуды сигнала по площади образцов матов ТРГ: образец #13 ($h = 10,2$ мм, $\rho = 154$ кг/м³) (а); образец #17 ($h = 10,2$ мм, $\rho = 180$ кг/м³) (б).

Зависимости амплитуды прошедшего сигнала в опорной точке $U_{оп}$ от средней плотности образца ρ для всех партий исследованных образцов и матов представлены на рис. 7. Для всех исследованных партий образцов наблюдается обратно пропорциональная зависимость амплитуды акустического сигнала от плотности образца, при этом крутизна и линейность указанных кривых существенно различна для разных значений толщины и плотности. Для образцов листов ТРГ толщиной $h = 0,2$ мм линейный характер зависимости амплитуды прошедшего сигнала от средней плотности образца ρ нарушается, при этом имеет место большой разброс экспериментальных точек, что обусловлено существенными вариациями плотности и толщины листа от средних значений, обусловленными сложностью обеспечения постоянства плотности при производстве листов и матов малых толщин. Так результаты измерения показывают, что наибольшее отклонение толщины по площади листа от среднего значения для партии листов ТРГ #6 ($h = 0,2$ мм) составляет 10 %, что объясняет нелинейную зависимость и достаточно большое отклонение амплитуды прошедшего сигнала от линии тренда.

Гистограммы чувствительности к изменению плотности для различной толщины листов и матов иллюстрирует рис. 8. Чувствительность оценена согласно линиям тренда, как отношение изме-

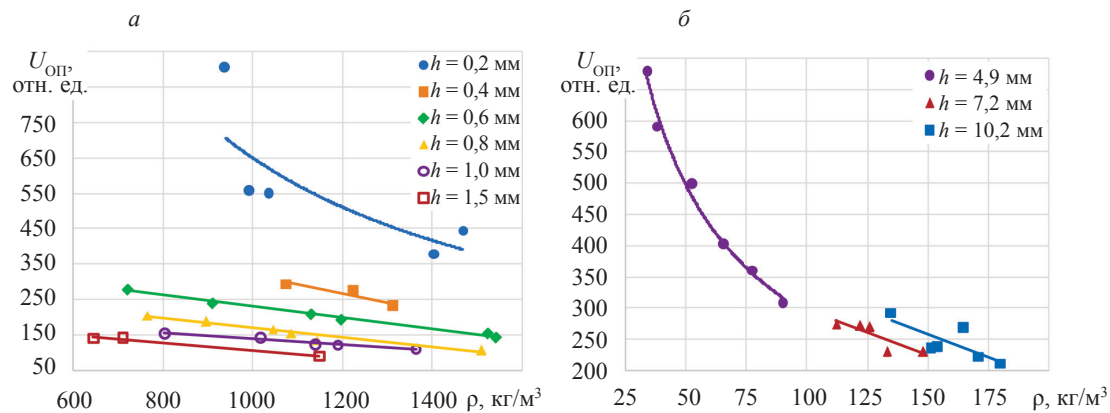


Рис. 7. Зависимости амплитуды прошедшего сигнала в опорной точке от средней плотности образцов ТРГ для пары преобразователей И1-П1: листы (а); маты (б).

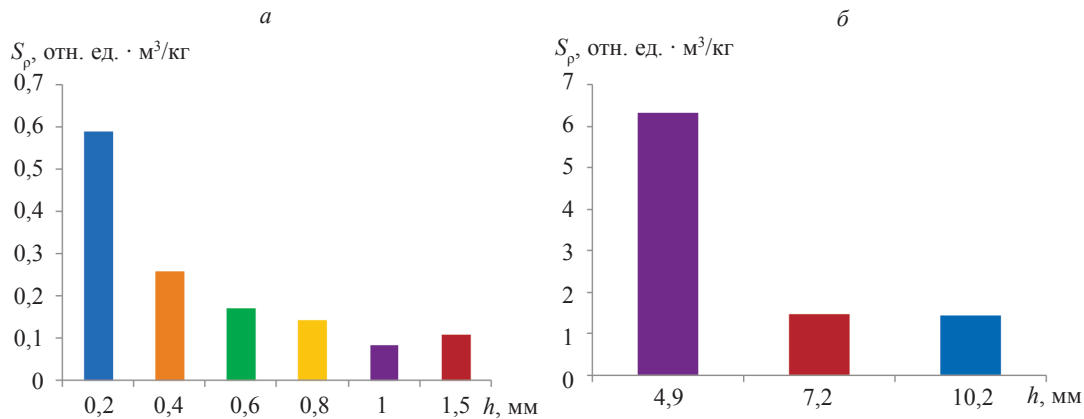


Рис. 8. Гистограммы чувствительности к изменению плотности для различной толщины листов (а) и матов (б).

нения амплитуды сигнала к соответствующему изменению средней плотности объекта. Согласно рис. 8, наибольшей чувствительностью к изменению плотности обладают листы и маты малой толщины (0,2 и 4,9 мм соответственно). Представленные зависимости показывают необходимость предварительного построения калибровочных кривых для каждой толщины контролируемых партий объектов при оценке абсолютных значений плотности акустическим методом.

ВЫВОДЫ

1. Выявлена линейная зависимость отклонения амплитуды прошедшего акустического сигнала от изменения плотности заготовки, полученной прямым весовым методом.
2. Проведена оценка предельной чувствительности акустического метода к изменению плотности и массы, составляющая 26 кг/м^3 и $0,02 \text{ г}$, что соизмеримо с погрешностями их измерения прямым методом.
3. Исследования разноплотности образцов листов и матов ТРГ показали, что для тонких образцов листов отклонения по плотности могут достигать 50 %, для матов — 30 %, при этом минимальная разноплотность для листов — не превышает 10—12 % относительно опорного значения.
4. Наблюдается обратно пропорциональная зависимость амплитуды прошедшего акустического сигнала от средней плотности образцов, наиболее выраженная для малых толщин матов и листов ТРГ.
5. Исследованные закономерности могут быть положены в разработку методов акустического контроля плотности и отклонений от нее для листов и матов ТРГ в процессе производства.

Авторы выражают благодарность сотрудникам предприятия ООО «СИЛУР» Д.В. Смирнову, А.А. Пономареву за предоставленные образцы и результаты верификации методики прямым весовым методом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-29-10167, <https://rscf.ru/project/23-29-10167/> с использованием УНУ «Информационно-измерительный комплекс для исследований акустических свойств материалов и изделий» (рег. номер: 586308).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филалов А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М.: Аспект-пресс, 1997. 718 с.
2. Murugan P., Nagarajan R.D., Shetty B.H., Govindasamy M., Sundramoorthy A.K. Recent trends in the applications of thermally expanded graphite for energy storage and sensors — a review // *Nanoscale Advances*. 2021. No. 3. P. 6294—6309.
3. Tarannum F., Danayat S.S., Nayal A., Muthaiah R., Annam R.S., Garg J. Large enhancement in thermal conductivity of solvent-cast expanded graphite/polyetherimide composites // *Nanomaterials*. 2022. No. 12 (11). P. 1877.
4. Исаев О.Ю., Смирнов Д.В., Пономарев А.А., Каменева А.Л., Шелемба И.С., Оглезнев А.А., Юдин Р.С. Контроль состояния уплотнения из терморасширенного графита на базе оптоволоконных технологий // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2018. Т. 20. № 4. С. 34—42.
5. Ноздрихин А.Д., Черепанова М.В., Потапов И.С. Увеличение термостойкости листового терморасширенного графита // *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*. 2019. № 1. С. 83—92.
6. Lee Y., Nithya S., Lee G. Boost charging lithium-ion battery using expanded graphite anode with enhanced performance // *Materials Letters*. 2021. V. 299. P. 130077.
7. Филимонов Д.А., Юдина Т.Ф., Базанов М.И., Братков И.В., Леонтьев Н.А. Электрохимические свойства различных углеродных материалов. Расчет адсорбции кислорода // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. 2017. Т. 60. № 2. С. 20—22.
8. Котов С.А., Музафарова С.-В.Р., Ливинцова М.Г. Исследование процессов уплотнения порошков терморасширенного графита при прокатке // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2019. Т. 17. № 8. С. 366—370.
9. Ноздрихин А.Д., Черепанова М.В., Потапов И.С. Определение условий терморасширения ин-теркалированного графита в печи с электрообогревом // *Южно-сибирский научный вестник*. 2020. № 1 (29). С. 102—107.
10. Бердников Р.А., Хименко Л.Л., Минченко Л.А., Ильин А.Н., Исаев О.Ю. Влияние состава пиротехнической смеси на сорбирующую способность терморасширенного графита, полученного методом термоудара // *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*. 2022. № 71. С. 129—136.
11. Яковлев А.В., Финаенов А.И., Забудьков С.Л. Терморасширенный графит: синтез, свойства и перспективы применения // *Журн. прикладной химии*. 2006. Т. 79. С. 1761—1771.
12. Каллаев С.Н., Бакмаев А.Г., Бабаев А.А., Билалов А.Р., Омаров З.М., Теруков Е.И. Теплофизические свойства терморасширенного графита // *Теплофизика высоких температур*. 2022. Т. 60. № 1. С. 19—22.
13. Berestneva Yu.V., Raksha E.V., Voitash A.A., Arzumanyan G.M., Savoskin M.V. Thermally expanded graphite from graphite nitrate cointercalated with ethyl formate and acetic acid: morphology and physicochemical properties // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1658. P. 012004.
14. Иванов А.В., Павлова Ю.А., Максимова Н.В., Похолок К.В., Малахо А.П., Авдеев В.В. Получение терморасширенного графита, модифицированного ферритом магния // *Неорганические материалы*. 2018. Т. 54. № 7. С. 668—674.
15. Белова М.Ю. От «черного мела» к уплотнениям из ТРГ // *Арматуростроение*. 2008. № 1 (52). С. 42—49.
16. Гревнов Л.М., Оглезнева С.А., Куликова А.А. Исследование легирования порошковых сталей разными формами углерода // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 11. С. 284—288.
17. Huang J., Zhao Z.Q., Chen T., Zhu Y., Lv Z.H., Gong X., Niu Y.Y., Ma B.G. Preparation of highly dispersed expandable graphite/polystyrene composite foam via suspension polymerization non-covalently compatibilized by polystyrene with enhanced fire retardation // *Carbon*. 2019. V. 146. P. 503—512.
18. Wei B., Zhang L., Yang S. Polymer composites with expanded graphite network with superior thermal conductivity and electromagnetic interference shielding performance // *Chemical engineering journal*. 2021. V. 404. P. 126437.
19. Jaszak P. Modeling of the elastic properties of compressed expanded graphite — a material used in spiral wound gaskets // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2020. V. 187. P. 104158.
20. Mohanty S., Nayak S.K. A new way synthesis of expanded graphite as a thermal filler to enhance the thermal conductivity of dgeba resin as thermal interface material // *High performance polymers*. 2020. V. 5. P. 506—523.

21. *Glebova N.V., Krasnova A.O., Nechitailov A.A.* Thermally expanded graphite as functional material in the technology of electrode material with mixed conductivity // Russian journal of applied chemistry. 2018. 91 (V. 8). P. 1262—1271.
22. *Берестнева Ю., Войташ А., Ракша Е., Балкушкин Р., Межевова А., Савоськин М.* Оценка возможности применения терморасширенного графита для очистки загрязненных природных вод // Химическая безопасность. 2021. Т. 5. № 1. С. 110—124.
23. *Китова А.Е., Медведева А.С., Быков А.Г., Колесов В.В., Решетилов А.Н.* Биосенсор на основе мембранных фракций *gluconobacter oхydans* модифицированный терморасширенным графитом // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2019. № 3. С. 63—69.
24. *Стручкова Т.С., Ньюрова А.Г., Николаева А.Д.* Исследование влияния терморасширенного графита на триботехнические характеристики политетрафторэтилена // Южно-сибирский научный вестник. 2019. № 4 (28). С. 303—306.
25. *Попов М.В., Брестер А.Е., Юсин С.И., Баннов А.Г.* Исследование пористых углеродных материалов для суперконденсаторов // Химия в интересах устойчивого развития. 2021. Т. 29. № 6. С. 691—701.
26. *Ракша Е.В., Глазунова В.А., Осколкова О.Н., Сухов П.В., Волкова Г.К., Давыдова А.А., Берестнева Ю.В., Савоськин М.В.* Углеродные наночастицы на основе терморасширенного графита: влияние способа получения ТРГ на морфологию частиц // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2021. № 13. С. 777—787.
27. *Караваев Д.М., Матыгулина Е.В., Сиротенко Л.Д., Дегтярев А.И.* Определение коэффициента трения композиционного материала на основе терморасширенного графита с кремнийорганическим связующим // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 2 (4). С. 775—778.
28. *Chung D. L.* A review of exfoliated graphite // Journal of Materials Science. 2016. V. 51. No. 1. P. 555.
29. *Bogdan O.P., Muravieva O. V., Zlobin D. V.* Acoustic Density Testing of Blanks Made of Thermally Expanded Graphite // AIP Conference Proceedings. Proceeding of the 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. 2020. C. 040008.
30. *Bogdan O.P., Zlobin D. V., Muravieva O. V., Muraviev V. V., Volkova L. V.* Acoustic and Eddy Current Methods of Nondestructive Testing of Thermally Expanded Graphite Sheets // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. C. 012033.
31. *Артемов А.В., Васильев С.Л., Юргенсон С.А., Кулаков В.В., Авдеев В.В.* Исследование макро-структуры углеродных фрикционных материалов методом рентгеновской томографии // Цветные металлы. 2012. № 12. С. 64—68.
32. *Богдан О.П., Муравьева О.В., Платунов А.В., Рысев Д.С.* Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 2. С. 61—68.
33. *Bogdan O.P., Zlobin D.V., Muravieva O.V., Molin S.M., Platunov A.V.* Evaluation of nonuniformity of elastic properties of sheets made from closed-cell polyolefin foams by acoustic method // Приборы и методы измерений. 2021. Т. 12. № 1. С. 58—66.
34. *Князьков Н.Н., Шарфарец Б.П.* Акустика пористо-упругих насыщенных жидкостью сред (обзор теории БИО) // Научное приборостроение. 2016. Т. 26. № 1. С. 77—84.