

УДК 620.179.161

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-1-97-105

Экспериментальная оценка возможности обнаружения сквозных дефектов в заготовках из терморасширенного графита акустическим методом

О. П. Богдан, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. В. Блинова, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Л. А. Денисов, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Представлены результаты оценки возможности обнаружения дефектов в заготовках из терморасширенного графита, используемых в качестве уплотнительных материалов, на примере сквозного отверстия бесконтактным акустическим теневым амплитудным методом при использовании в качестве информативного параметра изменение амплитуды акустического сигнала при его прохождении сквозь заготовку в дефектной и бездефектной области.

Полученные зависимости изменения амплитуды прошедшего сигнала сквозь заготовку от размера искусственного сквозного отверстия, плотности и толщины объекта показали существенное влияние данных параметров на обнаруживаемость дефекта, которые необходимо учитывать при разработке технологий контроля и в процессе его проведения. При этом увеличение всех влияющих параметров заготовки (плотность, толщина) и размера сквозного отверстия приводит к возрастанию изменения амплитуды прошедшего сигнала сквозь объект, что повышает чувствительность акустического контроля и выявляемость дефектов. На основе полученных зависимостей могут быть разработаны критерии браковки заготовок, используемых при проведении акустического контроля в процессе их производства или непосредственно перед изготовлением изделий из них.

Показано влияние позиционирования дефекта относительно акустической оси системы «излучатель – приемник», которое приводит к уменьшению информативного параметра и, следовательно, снижению чувствительности. Данная зависимость характерна для всех толщин и плотностей объектов, а также для всех размеров искусственных сквозных отверстий при проведении контроля сразу после формирования дефекта. При проведении акустического контроля через некоторое время после формирования дефекта максимум этой зависимости может сместиться вследствие смещения количества вещества для заполнения полости дефекта, что подтверждено с помощью микроскопии. Полученные результаты могут быть использованы при разработке параметров акустического контроля заготовок.

Ключевые слова: терморасширенный графит, акустический контроль, теневой амплитудный метод, искусственные дефекты.

Введение

Терморасширенный графит (ТРГ) – углеродистый материал с уникальными свойствами, нашедший широкое применение в разных областях науки и техники, в том числе и в особо опасных, в качестве уплотнительных прокладок [1]. Заготовки, из которых далее производят готовые изделия с различными присадками, покрытиями и без них, представляют собой порошкообразный спрессованный материал, обладающий пористой структурой, толщина и плотность которого зависят от количества вещества и внешнего механического воздействия [2].

Объекты из ТРГ необходимо подвергать неразрушающему контролю, как готовых изделий, так и заготовок в процессе их производства или

после, так как возникновение в них технологических или эксплуатационных дефектов может оказать влияние на эксплуатационные и физические характеристики [3], изменение которых будет иметь негативные последствия [4]. К наиболее часто встречающимся дефектам в пористых материалах, в том числе в ТРГ, относятся: локальные технологические микроскопические дефекты структуры [5, 6], нарушение пористости, макроскопические поры [7–9], трещины [10], расслоения [11–13], пузыри [14, 15], различные сквозные дефекты [16], вызванные механическим воздействием [17], отклонение геометрических размеров (толщины) [18], разнотолтность.

Для обнаружения, выявления и идентификации дефектов заготовок из ТРГ используются

© Богдан О. П., Блинова А. В., Денисов Л. А., 2024

* 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. № 586308).

различные методы разрушающего и неразрушающего контроля. Контроль разрушающими методами ТРГ проводят посредством стандартных методов механических испытаний [19, 20] и оптической микроскопии в порошкообразном виде (Патент на изобретение № 2686906) или шлифа.

Неразрушающий контроль заготовок из ТРГ в отличие от разрушающего труднее реализовать ввиду сложности взаимодействия различного рода излучений с пористой структурой. Анализ современной литературы показал, что в настоящее время активно ведутся исследования возможности применения уже известных и новых методов контроля. Наибольший интерес представляет визуально-измерительный контроль, макроанализ структуры, вихретоковый контроль, оптический контроль, электронная спектроскопия с использованием электромагнитного излучения в ультрафиолетовой области [21], термография, а также акустический контроль, вызывающий особый интерес. Для реализации акустического контроля используются волны звукового и ультразвукового диапазона и актив-

но разрабатываются новые методики: импульсная акустическая микроскопия, ультразвуковой эхо-метод при повышенной температуре, ультразвуковая В-скан-визуализация и различные вариации акустического бесконтактного метода, в том числе теневого амплитудного [22].

Цель работы – исследование возможности применения бесконтактного импульсного амплитудного теневого метода акустического контроля для обнаружения сквозных дефектов типа отверстия в заготовках из терморасширенного графита.

Используемые подходы

Исследование возможности обнаружения дефектов различных типов в заготовках из ТРГ основано на применении разработанной методики акустического контроля (Патент на изобретение № 2796231), основанной на регистрации изменения амплитуды прошедшего сигнала сквозь контролируемый объект (информативный параметр) [23]. Блок-схема экспериментальной установки, реализующей бесконтактную методику акустического контроля заготовок из ТРГ, представлена на рисунке 1.

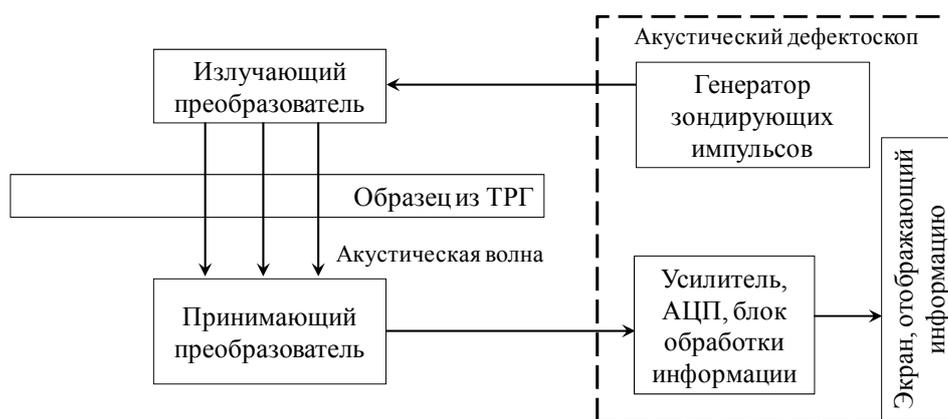


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки, реализующей акустический контроль образцов из ТРГ

Fig. 1. Block diagram of the experimental installation of acoustic control of TEG samples

Разработанный акустический дефектоскоп (Патент на изобретение № 2796231) генерирует короткий электрический импульс, возбуждающий излучающий преобразователь электродинамического типа, формирующий акустическую волну верхнего звукового диапазона (7...15 кГц). Излученная акустическая волна проходит сквозь заготовку из ТРГ и поступает на принимающий преобразователь, идентичный излучающему, и далее передается в приемный тракт акустического дефектоскопа, где сигнал усиливается, оцифровывается и обрабатывается с целью регистрации информативного параметра (амплитуды прошедшего сигнала), отображае-

мого на экране. В процессе сканирования бездефектной заготовки из ТРГ амплитуда прошедшего сигнала изменяется в пределах погрешности ± 2 отн. ед. В случае наличия дефектов в заготовке из ТРГ наблюдается более значительное отклонение амплитуды прошедшего сигнала относительно бездефектного объекта. Регистрируя отклонение амплитуды прошедшего сигнала и при наличии критериев браковки, можно сделать вывод о допустимости или недопустимости контролируемой заготовки к дальнейшему производству.

Отклонение амплитуды прошедшего сигнала сквозь заготовку из ТРГ определяется по формуле

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{U_0 - U}{U_0} 100\%,$$

где U_0 и U – амплитуда прошедшего сигнала сквозь заготовку из ТРГ в бездефектной и дефектной области соответственно.

Результаты и их обсуждение

Исследование возможности обнаружения дефектов в заготовках из ТРГ акустическим методом выполнено на примере искусственных дефектов в виде сквозных отверстий разного диаметра d . Для исследований использованы заготовки из ТРГ, толщиной $h = 0,4...1,5$ мм

плотностью $\rho = 600...1600$ кг/м³. Искусственные сквозные отверстия выполнены механическим способом с использованием игл разного размера, диаметр отверстий подтвержден с помощью микроскопии (рис. 2), показавшей изменение формы отверстия с течением времени.

Экспериментальные измерения изменения амплитуды прошедшего сигнала через заготовку из ТРГ с дефектом при позиционировании искусственного отверстия диаметром 0,4 и 0,62 мм по центру системы «излучатель – приемник» выполнены для образцов разной плотности и толщины, результаты представлены на рисунке 3.

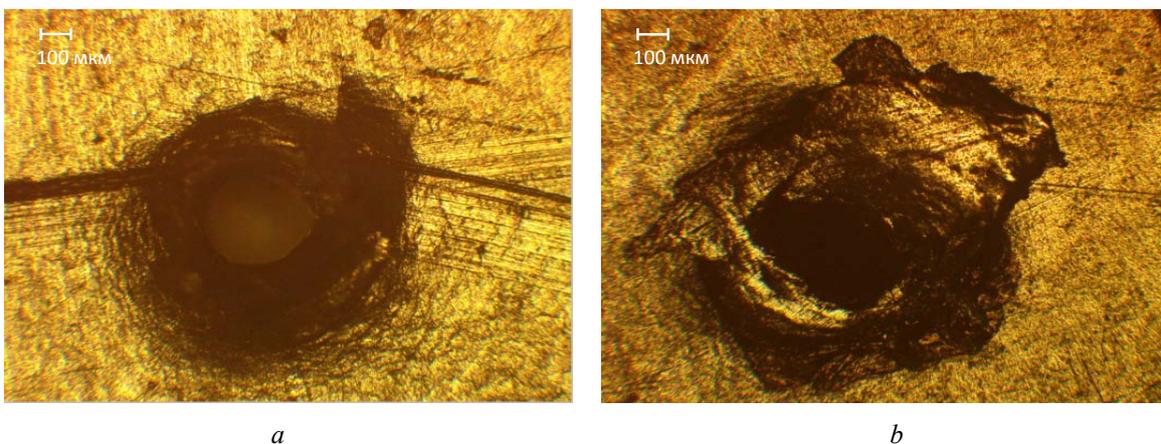


Рис. 2. Изображения отверстия при увеличении $\times 50$, полученные сразу после изготовления (a) и через одну неделю (b)

Fig. 2. Images of the artificial hole at $\times 50$ magnification obtained immediately after fabrication (a) and after one week (b)

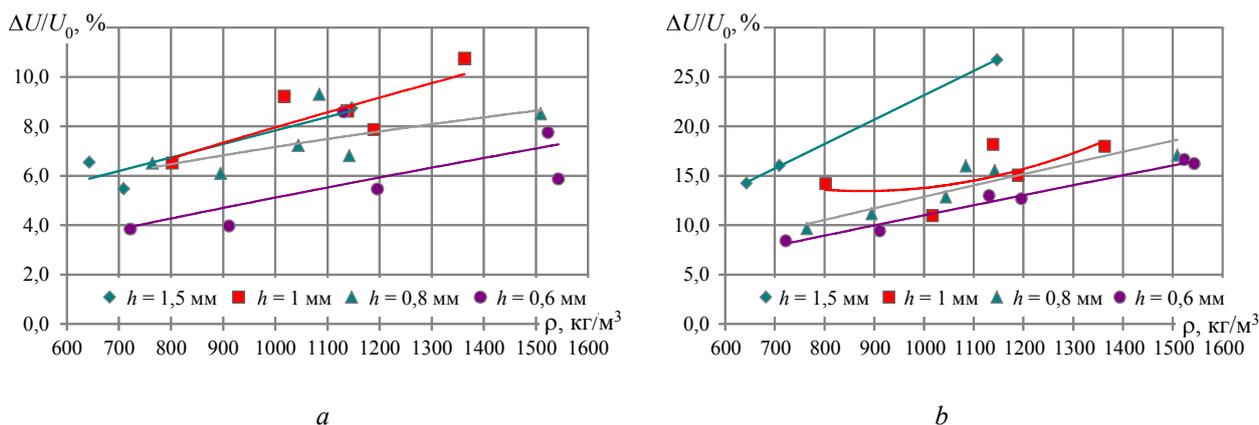


Рис. 3. Зависимость изменения амплитуды $\frac{\Delta U}{U_0}$, прошедшего сигнала через заготовку из ТРГ от ее плотности ρ для различной толщины h : a – $d = 0,4$ мм; b – $d = 0,62$ мм

Fig. 3. Dependence of measuring the amplitude $\frac{\Delta U}{U_0}$ of the passed signal through the TEG sample on its density ρ for different thickness h : a - hole diameter $d = 0.4$ mm; b - hole diameter $d = 0.62$ mm

Из графиков видно, что с увеличением плотности ρ наблюдается увеличение изменения амплитуды прошедшего сигнала $\frac{\Delta U}{U_0}$ для всех исследуемых толщин h заготовок из ТРГ. При этом для отверстия диаметром $d = 0,62$ мм наблюдается более существенное изменение амплитуды прошедшего сигнала $\frac{\Delta U}{U_0}$ относительно результатов измерения для диаметра отверстия $d = 0,4$ мм. Так, например, для заготовки толщиной $h = 0,8$ мм и плотностью $\rho = 900$ кг/м³ изменение амплитуды прошедшего сигнала составило $\frac{\Delta U}{U_0} = 6$ % при обнаружении $0,62$ мм, а для заготовки из ТРГ толщиной $h = 1,5$ мм и плотностью $\rho = 710$ кг/м³ $\frac{\Delta U}{U_0} = 5,5$ % – $d = 0,4$ мм и $\frac{\Delta U}{U_0} = 16$ % – $d = 0,62$ мм отверстия диаметром $d = 0,4$ мм и $\frac{\Delta U}{U_0} = 11$ % – $d = 0,62$ мм.

Наличие сквозного отверстия ведет к просачиванию энергии акустической волны в связи с изменением акустического импеданса листа, определяемого произведением плотности на скорость волны, на импеданс в области дефекта, полностью согласованный с воздушной средой. Применительно к сквозному дефекту тонкого слоя чем больше объем изменения акустического импеданса, определяемый толщиной листа и диаметром дефекта, тем больше согласование с воздухом и тем больше амплитуда сигнала.

Характер зависимостей изменения амплитуды $\frac{\Delta U}{U_0}$ прошедшего сигнала через заготовку из ТРГ от ее плотности ρ и от ее толщины h не идентичен для разных диаметров обнаруживаемых отверстий, что наглядно демонстрируют графики на рисунках 3 и 4.

Влияние толщины на изменение амплитуды $\frac{\Delta U}{U_0}$ прошедшего сигнала заготовки из ТРГ (рис. 4) более существенно для большего размера сквозного отверстия ($d = 0,62$ мм), при этом для более толстых заготовок ТРГ наблюдается возрастание данной зависимости: для толщины $h = 0,8$ мм – $\frac{\Delta U}{U_0} = 16$ %; для $h = 1,0$ мм –

$\frac{\Delta U}{U_0} = 17$ %; для $h = 1,5$ мм – $\frac{\Delta U}{U_0} = 27$ %. Для малого размера сквозного отверстия явная зависимость изменения амплитуды $\frac{\Delta U}{U_0}$ прошедшего сигнала от толщины заготовки из ТРГ отсутствует, а значение величины $\frac{\Delta U}{U_0}$ не превышает 10 %.

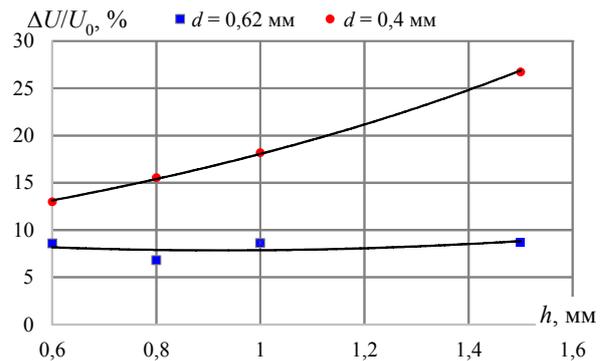


Рис. 4. Зависимость изменения амплитуды $\frac{\Delta U}{U_0}$ прошедшего сигнала через заготовку из ТРГ от ее толщины h ($\rho = 1140$ кг/м³)

Fig. 4. Dependence of measuring the amplitude $\frac{\Delta U}{U_0}$ of the transmitted signal through the TEG sample on its thickness h ($\rho = 1140$ kg/m³)

Влияние диаметра обнаруживаемого отверстия нелинейно на изменение амплитуды прошедшего сигнала сквозь заготовку из ТРГ (рис. 5). Увеличение диаметра отверстия приводит к росту изменения амплитуды прошедшего сигнала, как показано на примере заготовки из ТРГ ($h = 0,4$ мм, $\rho = 1363$ кг/м³): для отверстия диаметром $d = 0,4$ мм – $\frac{\Delta U}{U_0} = 11$ %;

для $d = 0,7$ мм – $\frac{\Delta U}{U_0} = 17$ %; для $d = 1,4$ мм –

$\frac{\Delta U}{U_0} = 58$ %.

Максимальная чувствительность к обнаружению сквозных отверстий в заготовках из ТРГ наблюдается при их позиционировании по центру излучающего и принимающего преобразователей. Для исследования влияния позиционирования отверстия диаметром $d = 0,4$ мм (Д1 на рис. 6) и $d = 0,62$ мм (Д2 на рис. 6) относительно

акустической оси преобразователей на изменение амплитуды прошедшего сигнала выполнено сканирование с шагом 10 мм (рис. 6) дефектной

области заготовки из ТРГ сразу после создания искусственного дефекта (рис. 7, а) и через одну неделю (рис. 7, b).

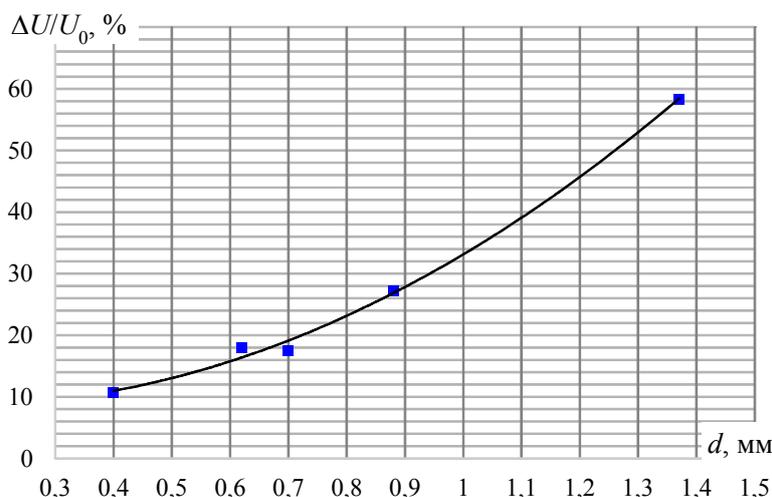


Рис. 5. Зависимость изменения амплитуды $\frac{\Delta U}{U_0}$ прошедшего сигнала через заготовку из ТРГ от диаметра искусственного отверстия d ($h = 0,4$ мм, $\rho = 1363$ кг/м³)

Fig. 5. Dependence of measuring the amplitude $\frac{\Delta U}{U_0}$ of the transmitted signal through the sample TEG on the diameter of the artificial hole d ($h = 0.4$ mm, $\rho = 1363$ kg/m³)

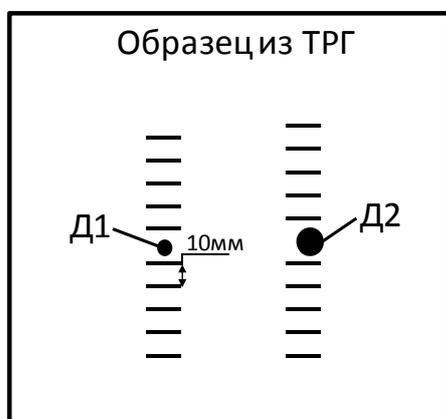


Рис. 6. Схема сканирования дефектной зоны заготовки размером 30×30 см

Fig. 6. Schematic of defect area scanning of the workpiece with a size of 30×30 cm

На рисунке 7 представлены графики зависимости изменения амплитуды $\frac{\Delta U}{U_0}$ прошедшего сигнала через заготовку из ТРГ ($\rho = 640$ кг/м³, $h = 1,5$ мм) от положения преобразователей. Как видно из графиков на рисунке 7, а, максимальной изменение амплитуды $\frac{\Delta U}{U_0}$ прошедшего

сигнала при обнаружении искусственного сквозного отверстия сразу после его изготовления наблюдалось в позиции «0», что соответствует его нахождению на акустической оси преобразователей как для отверстия диаметром $d = 0,4$ мм, так и для $d = 0,62$ мм. При перемещении преобразователей местоположение сквозного отверстия отклоняется от акустической оси и наблюдается существенное уменьшение изменения амплитуды прошедшего сигнала сквозь заготовку из ТРГ, что приводит к значительному снижению чувствительности к обнаружению дефекта. Это может объясняться тем, что большая часть акустической энергии переносится волной по акустической оси согласно диаграмме направленности акустического преобразователя. Отклонение местоположения дефекта от центра преобразователей более чем на 10...20 мм может привести к его пропуску, что необходимо учитывать при разработке схем контроля заготовок из ТРГ при предъявлении требований к шагу сканирования.

Через одну неделю после изготовления искусственного сквозного отверстия выполнено повторное сканирование дефектной области с целью оценки возможности обнаружения дефекта, размеры которого могут измениться в те-

чение времени. Результаты исследования представлены на рисунке 7, *b*. Повторное измерение изменения амплитуды прошедшего сигнала сквозь заготовку из ТРГ от позиционирования отверстия показало уменьшение чувствительности к ним примерно в 2 раза для отверстия диаметром $d = 0,62$ мм и в 3 раза для $d = 0,4$ мм, объясняющееся релаксацией напряжений в материале, вызванных механическим воздействием при создании сквозного дефекта, что подтвер-

ждается результатами микроскопии (рис. 2, *b*). При этом в стороне от центра преобразователей на расстоянии 30...50 мм наблюдается рост изменения амплитуды прошедшего сигнала сквозь заготовку из ТРГ, что может объясняться уменьшением толщины образца и уменьшении количества вещества связанное с движением структуры в связи с зарастанием дефекта. Причем данная аномалия более выражена для меньшего по диаметру отверстия ($d = 0,4$ мм).

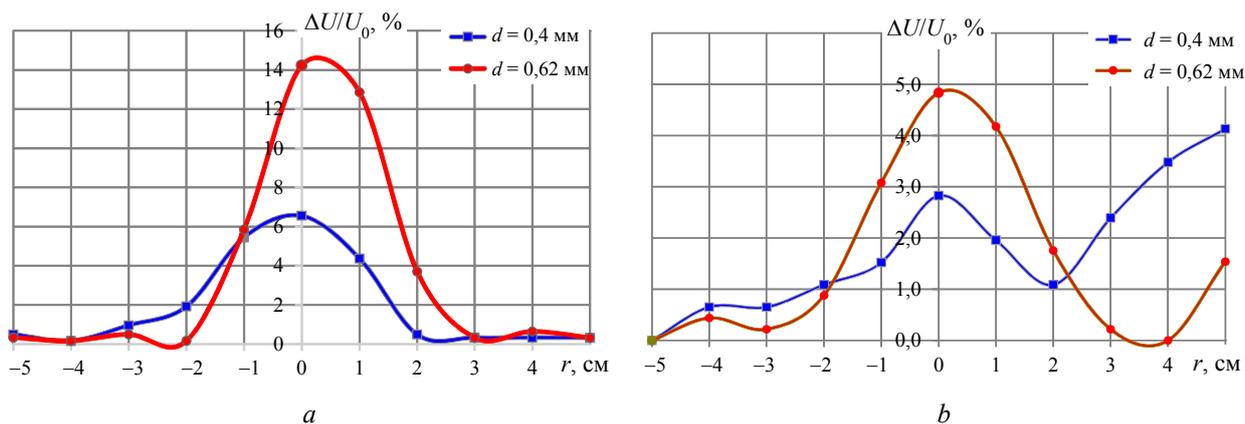


Рис. 7. Зависимость изменения амплитуды $\frac{\Delta U}{U_0}$ прошедшего сигнала через заготовку из ТРГ ($\rho = 640$ кг/м³, $h = 1,5$ мм) от положения преобразователей: *a* – сразу после изготовления отверстия; *b* – через неделю после изготовления отверстия

Fig. 7. Dependence of the change in the amplitude $\frac{\Delta U}{U_0}$ of the transmitted signal through the TEG sample ($\rho = 640$ kg/m³, $h = 1.5$ mm) on the position of the transducers: *a* - immediately after the hole fabrication; *b* - one week after the hole fabrication

Выводы

В работе показана возможность проведения акустического контроля заготовок из ТРГ бесконтактным теневым амплитудным методом, основанным на регистрации изменения амплитуды прошедшего сигнала сквозь образец в дефектной и бездефектной области, и обладающий высокой чувствительностью к выявлению сквозных дефектов.

Результаты исследований показали, что на величину информативного параметра оказывают влияние размер и местоположение сквозных дефектов, толщина и плотность заготовки из ТРГ, а также интервал времени после возникновения дефекта, так как объект контроля является спрессованным порошкообразным материалом, склонным к перемещению количества вещества в случае нарушения сплошности, превышающей размеры пор.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке технологии акустического кон-

троля заготовок из ТРГ, в частности при определении критериев браковки и параметров контроля.

Библиографические ссылки

1. Bogdan O.P., Murav'eva O.V., Blinova A.V., Zlobin D.V. (2023) Investigation of density of samples made of thermally expanded graphite by acoustic amplitude-shadow method. Russian Journal of Nondestructive Testing, vol. 59, no. 8, pp. 857-867. DOI: 10.1134/s106183092370050x
2. Определение физико-механических свойств графитовой фольги / В. М. Волгин, А. А. Потапов, П. Э. Калиш, А. П. Малахов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 9. С. 343–349.
3. Контроль состояния уплотнения из терморасширенного графита на базе оптоволоконных технологий / О. Ю. Исаев, Д. В. Смирнов, А. А. Пономарев, А. Л. Каменева, И. С. Шелемба, А. А. Оглезнев, Р. С. Юдин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Машиностроение, материаловедение. 2018. Т. 20, № 4. С. 34–42. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.04

4. Попов Д. П. Технический контроль прокладочных материалов на основе терморасширенного графита, применяемых на объектах нефтепереработки // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2010. № 3. С. 30–36.

5. Эффективные упругие модули тканых композитов с локальными технологическими дефектами в матрице из терморасширенного графита / Д. В. Дедков, А. В. Зайцев, И. Ю. Зубко, А. А. Ташкинов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2020. Т. 2. С. 129–132.

6. Дедков Д. В., Ташкинов А. А. Моделирование деформирования тканых керамо-керамических композитов полотняного плетения с локальными технологическими дефектами // Математическое моделирование в естественных науках. 2016. Т. 1. С. 573–577.

7. Hudson T.B., Follis P.J., Pinakidis J.J., Sreekanthamurthy T. (2021) Porosity detection and localization during composite cure inside an autoclave using ultrasonic inspection. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 147, 106337 p. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106337

8. Niskanen M., Duclos A., Dazel O., Groby J.-P., Kaipio J., Lahivaara T. (2019) Estimating the material parameters of an inhomogeneous poroelastic plate from ultrasonic measurements in water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 146, no. 4, pp. 2596-2607. DOI: 10.1121/1.5129369

9. Mortada H., Mousharrafie S., Mahfoud E., Harb M. (2023) Noncontact nondestructive ultrasonic techniques for manufacturing defects monitoring in composites: a review. *Structural Health Monitoring*. DOI: 10.1177/14759217231184589

10. Corredor R.M., Santos J.E., Gauzellino P., Carcione J.M. (2016) Validation of the boundary conditions to model the seismic response of fractures. *Geophysical Prospecting*, vol. 64, no. 4, pp. 1149-1165. DOI: 10.1111/1365-2478.12375

11. Zhang Z., Liu M., Li Q., Ang Y. (2020) Visualized characterization of diversified defects in thick aerospace composites using ultrasonic B-scan. *Composites Communications*, vol. 22, 100435 p. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100435

12. Quattrocchi A., Freni F., Montanini R. (2020) Air-coupled ultrasonic testing to estimate internal defects in composite panels used for boats and luxury yachts. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 14, pp. 35-41. DOI: 10.1007/s12008-019-00611-5

13. Moreno E., Giacchetta R., Gonzalez R., Sanchez D. (2023) Ultrasonic Non-Contact Air-Coupled Technique for the Assessment of Composite Sandwich Plates Using Antisymmetric Lamb Waves. *NDT*, vol. 1, pp. 58-73. DOI: 10.3390/ndt1010006

14. Haugwitz C., Thomas H.-J., Gianni A., Jan H. (2023) Detection of Air-Voids in Foam-filled Sandwich Panels using Air-Coupled Lamb Waves: 2023 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), pp. 1-4. DOI: 10.1109/IUS51837.2023.10307250

15. Визуализация структуры нанокompозитов методами акустической микроскопии / В. М. Левин, Ю. С. Петронюк, Е. С. Мороков, С. Беллуччи, П. Кижур // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2014. № 5.

16. Netzelmann U., Mross A., Waschkies T., Weber D. (2022) Nondestructive testing of the integrity of solid oxide fuel cell stack elements by ultrasound and thermographic techniques. *Energies*, vol. 15, no. 3, 831 p. DOI: 10.3390/en15030831

17. Исследование характеристик листов пенополиэтилена акустическими методами / О. П. Богдан, О. В. Муравьева, А. В. Платунов, Д. С. Рысев // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 2. С. 61–68. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-61-68

18. Захаров В. А., Захаров К. В., Ширяева М. Ю. Возможности неразрушающих методов контроля графитовых элементов технических устройств // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2023. № 2 (134). С. 12–19. DOI: 10.33285/1999-6934-2023-2(134)-12-19

19. Моделирование условий эксплуатации уплотнительных элементов из терморасширенного графита / А. В. Зайцев, В. С. Кокшаров, И. В. Предков, И. А. Судаков // Математическое моделирование в естественных науках. 2015. Т. 1. С. 130–135.

20. Караваев Д. М., Русин Е. С. Разработка метода механических испытаний композиционных материалов на основе терморасширенного графита в диапазоне рабочих температур // *Master's journal*. 2021. № 1. С. 55–57.

21. Электронная спектроскопия графена, полученного методом ультразвукового диспергирования / А. Г. Касцова, Н. В. Глебова, А. А. Нечитайлов, А. О. Краснова, А. О. Пелагейкина, И. А. Елисеев // Письма в журнал технической физики. 2022. Т. 48, № 24. С. 23–25. DOI: 10.21883/pjtf.2022.24.54019.19268

22. Bogdan O.P., Zlobin D.V., Murav'eva O.V., Molin S.M., Platonov A.V. (2021) Evaluation of nonuniformity of elastic properties of sheets made from closed-cell polyolefin foams by acoustic method. *Devices and Methods of Measurements*, vol. 12, no. 1, pp. 58-66. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-1-58-66

23. Универсальная экспериментальная установка для проведения акустических исследований / Д. В. Злобин, Л. В. Волкова, О. П. Богдан, Т. И. Земсков, С. В. Казанцев // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18, № 2. С. 28–36. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-28-36

References

1. Bogdan O.P., Murav'eva O.V., Blinova A.V., Zlobin D.V. (2023) Investigation of density of samples made of thermally expanded graphite by acoustic amplitude-shadow method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 59, no. 8, pp. 857-867. DOI: 10.1134/s106183092370050x

2. Volgin V.M., Potapov A.A., Kalish P.E., Malakho A.P. (2023) [Opredelenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv grafitovoi fol'gi]. *Izvestiya Tul'skogo gosu-*

darstvennogo universiteta. *Tekhnicheskie nauki*, no. 9, pp. 343-349 (in Russ.).

3. Isaev O.Yu., Smirnov D.V., Ponomarev A.A., Kameneva A.L., Shelemba I.S., Ogleznev A.A., Yudin R.S. (2018) [Seals condition monitoring from thermal-extended graphite based on optical fiber technologies]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, vol. 20, no. 4, pp. 34-42 (in Russ.). DOI: 10.15593/2224-9877/2018.4.04

4. Popov D.P. (2010) [Usage of flange gaskets materials on the basis of thermo-expanded graphite in oil-refining industry]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, no. 3, pp. 30-36 (in Russ.).

5. Dedkov D.V., Zaitsev A.V., Zubko I.Yu., Tashkinov A.A. (2020) [Effektivnyye uprugie moduli tkanykh kompozitov s lokal'nymi tekhnologicheskimi defektami v matritse iz termorasshirenno grafita]. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i inovatsii*, vol. 2, pp. 129-132 (in Russ.).

6. Dedkov D.V., Tashkinov A.A. (2016) [Modelirovanie deformirovaniya tkanykh keramo-keramicheskikh kompozitov polotnyanogo pleteniya s lokal'nymi tekhnologicheskimi defektami]. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh*, vol. 1, pp. 573-577 (in Russ.).

7. Hudson T.B., Follis P.J., Pinakidis J.J., Sreekanthamurthy T. (2021) Porosity detection and localization during composite cure inside an autoclave using ultrasonic inspection. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 147, 106337 p. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106337

8. Niskanen M., Duclos A., Dazel O., Groby J.-P., Kaipio J., Lahivaara T. (2019) Estimating the material parameters of an inhomogeneous poroelastic plate from ultrasonic measurements in water. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 146, no. 4, pp. 2596-2607. DOI: 10.1121/1.5129369

9. Mortada H., Mousharrafie S., Mahfoud E., Harb M. (2023) Noncontact nondestructive ultrasonic techniques for manufacturing defects monitoring in composites: a review. *Structural Health Monitoring*. DOI: 10.1177/14759217231184589

10. Corredor R.M., Santos J.E., Gauzellino P., Carcione J.M. (2016) Validation of the boundary conditions to model the seismic response of fractures. *Geophysical Prospecting*, vol. 64, no. 4, pp. 1149-1165. DOI: 10.1111/1365-2478.12375

11. Zhang Z., Liu M., Li Q., Ang Y. (2020) Visualized characterization of diversified defects in thick aerospace composites using ultrasonic B-scan. *Composites Communications*, vol. 22, 100435 p. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100435

12. Quattrocchi A., Freni F., Montanini R. (2020) Air-coupled ultrasonic testing to estimate internal defects in composite panels used for boats and luxury yachts. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 14, pp. 35-41. DOI: 10.1007/s12008-019-00611-5

13. Moreno E., Giacchetta R., Gonzalez R., Sanchez D. (2023) Ultrasonic Non-Contact Air-Coupled Technique for the Assessment of Composite Sandwich Plates Using Antisymmetric Lamb Waves. *NDT*, vol. 1, pp. 58-73. DOI: 10.3390/ndt1010006

14. Haugwitz C., Thomas H.-J., Gianni A., Jan H. (2023) Detection of Air-Voids in Foam-filled Sandwich Panels using Air-Coupled Lamb Waves: 2023 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), pp. 1-4. DOI: 10.1109/IUS51837.2023.10307250

15. Levin V.M., Petronyuk Yu.S., Morokov E.S., Belluchchi S., Kizhur P. (2014) [Acoustic microscopy of epoxy-graphite nanocomposite]. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta*, no. 5 (in Russ.).

16. Netzelmann U., Mross A., Waschkie T., Weber D. (2022) Nondestructive testing of the integrity of solid oxide fuel cell stack elements by ultrasound and thermographic techniques. *Energies*, vol. 15, no. 3, 831 p. DOI: 10.3390/en15030831

17. Bogdan O.P., Murav'eva O.V., Platunov A.V., Rysev D.S. (2020) [Study of characteristics of polyethylene foam sheets by acoustic methods]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 23, no. 2, pp. 61-68 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-2-61-68

18. Zakharov V.A., Zakharov K.V., Shiryayeva M.Yu. (2023) [Possibilities of non-destructive methods for controlling graphite elements of technical devices]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, no. 2, pp. 12-19 (in Russ.). DOI: 10.33285/1999-6934-2023-2(134)-12-19

19. Zaitsev A.V., Koksharov V.S., Predkov I.V., Sudakov I.A. (2015) [Modelirovanie uslovii ekspluatatsii uplotnitel'nykh elementov iz termorasshirenno grafita]. *Matematicheskoe modelirovanie v estestvennykh naukakh*, vol. 1, pp. 130-135 (in Russ.).

20. Karavaev D.M., Rusin E.S. (2021) [Razrabotka metoda mekhanicheskikh ispytaniy kompozitsionnykh materialov na osnove termorasshirenno grafita v diapazone rabochnih temperatur]. *Master's journal*, no. 1, pp. 55-57 (in Russ.).

21. Kascova A.G., Glebova N.V., Nechitajlov A.A., Krasnova A.O., Pelagejkina A.O., Eliseev I.A. (2022) [Electronic spectroscopy of graphene obtained by ultrasonic dispersion]. *Pis'ma v zhurnal tehnichekoj fiziki*, vol. 48, no. 24, pp. 23-25 (in Russ.). DOI: 10.21883/pjtf.2022.24.54019.19268

22. Bogdan O.P., Zlobin D.V., Murav'eva O.V., Molin S.M., Platunov A.V. (2021) Evaluation of nonuniformity of elastic properties of sheets made from closed-cell polyolefin foams by acoustic method. *Devices and Methods of Measurements*, vol. 12, no. 1, pp. 58-66. DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-1-58-66

23. Zlobin D.V., Volkova L.V., Bogdan O.P., Zemskov T.I., Kazancev S.V. (2020) [A versatile experimental setup for the acoustic research]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 18, no. 2, pp. 28-36 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-28-36

Experimental Evaluation of the Possibility of Through Defects Detection in Thermally Expanded Graphite Workpieces by Acoustic Method

O.P. Bogdan, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.V. Blinova, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

L.A. Denisov, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper presents the results of evaluating the possibility of detecting defects (e.g., through holes) in workpieces made of thermally expanded graphite used as sealing materials using a non-contact air-coupled acoustic inspection system. The deviation of the acoustic signal amplitude when it passes through a sample of thermally expanded graphite in defective and defect-free regions is used as an informative parameter.

The obtained dependences of the change in the amplitude of the passed signal through the sample on the size of the artificial through hole, density and thickness of the object showed a significant influence of these parameters on the detectability of the defect, which should be taken into account in the development of inspection technologies and in the process of its implementation. The change in the amplitude of the signal passed through the object directly depends on the increase in the parameters of the sample (density, thickness) and the size of the through hole, which increases the sensitivity of acoustic control and detectability of defects. On the basis of the obtained dependences the criteria for rejection of workpieces can be developed at the stage of production or immediately before manufacturing of their products.

The influence of defect positioning relative to the acoustic axis of the transmitter-receiver system is shown, which leads to a decrease in the informative parameter, and consequently to a decrease in sensitivity. This dependence is characteristic for all thicknesses and densities of objects, as well as for all sizes of artificial through holes when control is carried out immediately after defect formation. When acoustic inspection is carried out some time after the defect formation, the maximum of this dependence may shift due to the shift of the amount of substance to fill the defect cavity, which is confirmed by microscopy. The obtained results can be used in the development of workpieces acoustic control parameters.

Keywords: thermally expanded graphite, acoustic inspection, air-coupled, artificial defects.

Получено 16.05.2024

Образец цитирования

Богдан О. П., Блинова А. В., Денисов Л. А. Экспериментальная оценка возможности обнаружения сквозных дефектов в заготовках из терморасширенного графита акустическим методом / Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 2. С. 97–105. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-97-105

For Citation

Bogdan O.P., Blinova A.V., Denisov L.A. (2024) [Experimental Evaluation of the Possibility of Through Defects Detection in Thermally Expanded Graphite Workpieces by Acoustic Method]. Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2024, vol. 27, no. 2, pp. 97-105 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-2-97-105