



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ МИКРОСФЕР АЛЮМОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА *

Гончар А.В.¹, Мишакин В.В.¹, Романова Е.А.², Романов А.Д.², Курашкин К.В.¹,
Соловьев А.А.²

¹ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», г. Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе приведены результаты определения эффективных модулей упругости алюмоматричного композиционного материала, упрочненного полыми керамическими микросферами диаметром 40-80 мкм и 100-200 мкм. Проведены исследования зависимости скоростей объемных упругих волн и плотности композиционного материала, созданного на основе алюминиевого сплава А6, от объемного содержания полых керамических микросфер. По данным измерения скоростей упругих волн были рассчитаны эффективные модули: Юнга, сдвига, и объемного сжатия матрицы материала. В приближении Фойгта, определены эффективные модули армирующих частиц. С учетом объемной доли микросфер рассчитаны эффективные модули упругости упрочняющих частиц.

Получен, высокий коэффициент корреляции предела прочности с модулями упругости при изменении объемной доли армирующих частиц. Получено, что модули сдвига армирующих частиц отличаются от модулей матрицы на 33% (частицы 40-80 мкм) и на 38% для частиц 100-200 мкм, модули объемного сжатия на 60 и 150% и модули Юнга на 37 и 58% соответственно.

Прочностные свойства микросфер и упругие характеристик микрочастиц взаимосвязаны, что отражается на величине предела прочности композита в целом и его упругих свойствах. Полученные данные показывают, что определение упругих характеристик ультразвуковым методом позволит оценить прочностные свойства композита без его разрушения.

Ключевые слова: алюминий; алюмоматричный композиционный материал; получение; механические свойства; полые керамические микросферы

DETERMINATION OF EFFECTIVE MODULES OF ELASTICITY OF CERAMIC MICROSPHERES OF ALUMINUM MATRIX COMPOSITE MATERIAL

Gonchar A.V.¹, Mishakin V.V.¹, Romanova E.A.², Romanov A.D.², Kurashkin K.V.¹,
Solovyov A.A.²

* Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №22-29-20208). С использованием оборудования центра коллективного пользования ИПФ РАН.

¹*Federal Research Center Institute of Applied Physics
named after. A.V. Gaponov-Grekhov RAS, Nizhny Novgorod, Russia*
²*Nizhny Novgorod State Technical University named after. R.E. Alekseeva,
Nizhny Novgorod, Russia*

ABSTRACT

The paper presents the results of determining the effective modulus of elasticity of an aluminum matrix composite material reinforced with hollow ceramic microspheres with a diameter of 40-80 microns and 100-200 microns. Studies have been carried out on the dependence of the velocities of volumetric elastic waves and the density of a composite material created on the basis of A6 aluminum alloy on the volumetric content of hollow ceramic microspheres. Based on the measurement data of elastic wave velocities, the effective moduli of Young, shear, and volumetric compression of the material matrix were calculated. In the Voigt approximation, the effective moduli of the reinforcing particles are determined. Taking into account the volume fraction of microspheres, the effective elastic moduli of the strengthening particles were calculated.

A high correlation coefficient between the tensile strength and elastic moduli was obtained when the volume fraction of reinforcing particles changes. It was found that the shear moduli of the reinforcing particles differ from the matrix moduli by 33% (particles 40-80 μm) and by 38% for particles 100-200 μm , volumetric compression moduli by 60 and 150%, and Young's moduli by 37 and 58%, respectively.

The strength properties of microspheres and the elastic characteristics of microparticles are interrelated, which is reflected in the tensile strength of the composite as a whole and its elastic properties. The data obtained show that determining the elastic characteristics by the ultrasonic method will make it possible to evaluate the strength properties of the composite without its destruction.

Keywords: aluminium; aluminum-matrix composite material; production; mechanical properties; hollow ceramic microspheres

ВВЕДЕНИЕ

Среди металломатричных композиционных материалов наибольшее распространение получили алюмоматричные композиционные материалы [1,2]. При сохранении достоинств алюминиевых сплавов армирование дисперсными частицами или волокнами значительно повышает механические свойства композицитов, практически не влияя на его плотность. Контроль состояния этого типа материалов без разрушения является актуальной задачей для обеспечения надежности изделий при их эксплуатации.

Объемная доля армирующих частиц, их физические свойства во многом определяют прочность композитных материалов. Одними из основных методов неразрушающего контроля состояния композиционных материалов и металлических сплавов, наиболее удобным в инженерном плане, являются ультразвуковые методы контроля, в частности эхо-импульсный метод [3-6]. Он позволяет оценить неоднородность материала, наличие дефектов, как на макро, так и на микроуровне, определить упругие характеристики матрицы и армирующих микрочастиц, которые, как правило, имеют высокую степень корреляции с их прочностными свойствами. Акустические характеристики, в частности скорости упругих волн с учетом плотности материала позволяют вычислить модули упругости исследуемого композита. Известно, что упругие

постоянные изотропного материала, к которым относятся материалы, армированные равноосными частицами, можно выразить через скорости продольной V_l , поперечной волны V_t и плотности материала ρ [7]

$$\mu = \rho V_t^2; \quad (1)$$

$$E = \left[\rho V_t^2 (4V_l^2 - 3V_t^2) \right] / \left[V_l^2 - V_t^2 \right]; \quad (2)$$

$$K = \rho \left(V_l^2 - \frac{4}{3} V_t^2 \right); \quad (3)$$

$$\nu = \left[0,5 - (V_t/V_l)^2 \right] / \left[1 - (V_t/V_l)^2 \right], \quad (4)$$

где μ – модуль сдвига, E – модуль Юнга, K – модуль объемного сжатия, ν – коэффициент Пуассона.

Величины μ , E , K и ν связаны соотношениями [4]

$$E = 9K / (1 + 3K/\mu); \quad \nu = [3K - 2\mu] / [6K + 2\mu]. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что только два модуля являются независимыми величинами, и упругие свойства в случае изотропного тела определяются двумя упругими постоянными.

Изменение модулей упругости микронеоднородных сред, например, композита, состоящего из матрицы, армированной частицами, можно учесть, используя различные приближения [8]. В приближении Фойгта модули упругости рассчитывались с помощью следующего выражения

$$M = M_M (1 - \Phi_A) + M_{эф} \Phi_A, \quad (6)$$

где M – модули упругости всего материала, M_M – модули упругости матрицы, $M_{эф}$ – эффективные модули упругости армирующих частиц, Φ_A – объемное содержание частиц.

Из выражения (6) для эффективных модулей упругости армирующих частиц получим

$$M_{эф} = \left[M - M_M (1 - \Phi_A) \right] / \Phi_A. \quad (7)$$

Прочностные свойства микросфер и, следовательно, композита, отражаются на упругих характеристиках материала в целом. Например, толщина стенки и соотношение толщины сферы к ее диаметру влияют как на его деформационную способность в упругой области, так и на прочность сфер, активно влияющих на прочность композита в целом. Поэтому, в этом случае, следует ожидать высокую корреляцию между упругими свойствами материала и прочностными характеристиками.

Целью работы является исследование связи упругих модулей алюмоматричного композиционного материала с его пределом прочности и определение эффективных модулей упругости армирующих частиц композита ультразвуковым эхо-импульсным методом.

МАТЕРИАЛ, ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использовались образцы диаметром 25 мм, толщиной 9 мм из алюмоматричного композиционного материала. Для выполнения работ использовались образцы с матрицей из сплава А6 (99,6 % Al, до 0,25% Fe, до 0,18% Si), ГОСТ 11069-2001, упрочненные микросферами диаметром

40-80 мкм и 100-200 мкм. В работе использовались алюмосиликатные зольные микросферы следующего состава [1], масс. %: SiO_2 – 62,0%; Al_2O_3 – 27,0%; K_2O – 3,5%; Fe_2O_3 – 3,1%; CaO – 1,4%; MgO – 1,2%; TiO_2 – 0,8%; Na_2O – 0,6%. Ультразвуковые измерения на образцах проводились по схеме, приведенной на рис.1.

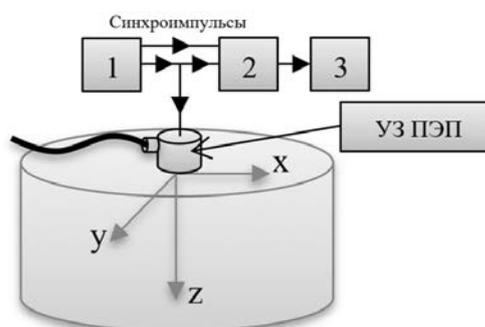


Рис.1. Схема ультразвуковых измерений: 1 – генератор электрических импульсов; 2 – цифровой осциллограф; 3 – РС.

Время распространения упругих волн измерялось с помощью ультразвукового эхо-метода. Для возбуждения сдвиговых и продольных волн применялись пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП рис.1) соответственно V156 и V110 производства Olympus с диаметром рабочей пластины 6 мм и несущей частотой 5 МГц. Продольные и поперечные волны распространяются перпендикулярно поверхности образца. В качестве генератора импульсов использовался ультразвуковой дефектоскоп A1212 МАСТЕР. Цифровой осциллограф LA-n1USB с программным обеспечением ADCLab был использован для записи амплитудно-временной диаграммы эхо-импульсов от пьезопреобразователя на персональный компьютер (РС). Частота дискретизации – 1 Гц, временное разрешение – 1 нс. В результате обработки данных с помощью специальной программы были получены времена распространения упругих волн t_{zx} , t_{zy} и t_{zz} после каждого этапа нагружения. При расчёте времени использовалось усреднённое значение времён распространения в трех зонах. Погрешность измерения времени распространения составляла 2-3 нс. Необходимо учитывать, что исследуемые материалы обладают некоторой малой анизотропией упругих свойств. Это приводит к эффекту двулучепреломления поперечных волн. В наших исследованиях время распространения поперечных волн t_s определяется как средняя величина времени распространения поперечных волн t_{zx} и t_{zy} , поляризованных вдоль осей x и y упругой анизотропии материала $t_s = (t_{zx} + t_{zy})/2$. Направление осей анизотропии определялось по эффекту двулучепреломления. Измерения проводились в центральной зоне каждого образца не менее пяти раз, результаты усреднялись.

Скорости рассчитывались с помощью следующих выражений: $V_L = 2h/t_L$, $V_S = 2h/t_S$, где $t_L = t_{zz}$, $2h$ – длина акустического пути, h – толщина образца. Погрешность определения скорости ≈ 3 м/с. Плотность материала определяли с помощью гидровзвешивания. Испытания на одноосное растяжение образцов проводили по ГОСТ 1497-84, тип образцов IV, диаметр рабочей части 20 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис.2. приведена кривая зависимости предела прочности от объемного содержания армирующих частиц.

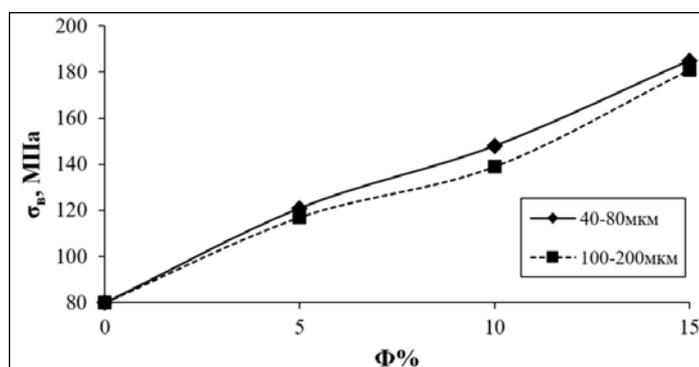
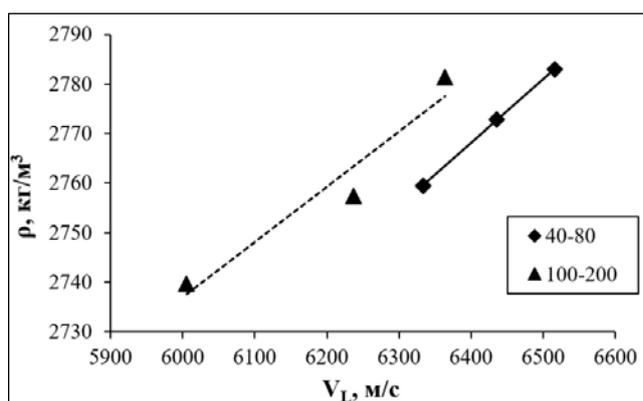
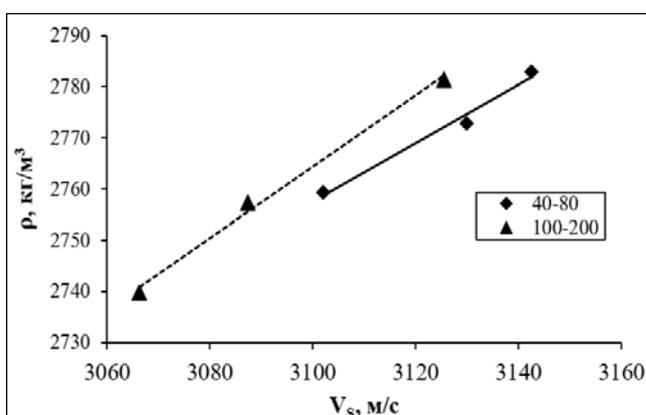


Рис.2. Зависимости предела прочности от объемного содержания армирующих частиц.

Связи скоростей продольных и поперечных волн с плотностью материала приведены на рис.3.



а



б

Рис.3. Связи скоростей продольных (а) и поперечных (б) волн с плотностью материала.

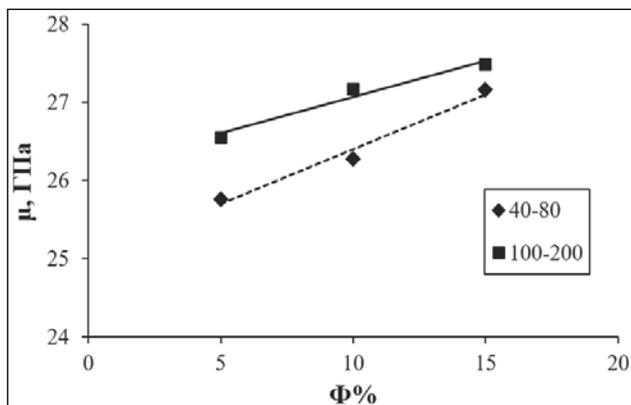
Связь плотности со скоростями УВ определяется выражениями

$$\rho = 0,1115V_L + 2067,9 \text{ (для 40-80 мкм)}, \tag{8}$$

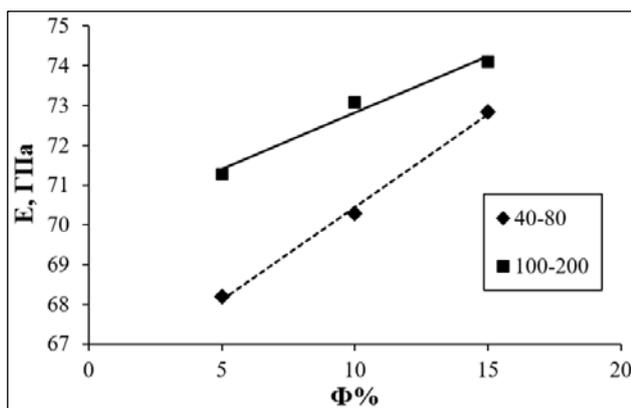
$$\rho = 0,1295V_L + 1939,2 \text{ (для 100-200 мкм)}. \tag{9}$$

Используя выражения (1)-(3) и (8)-(9) были рассчитаны модули упругости.

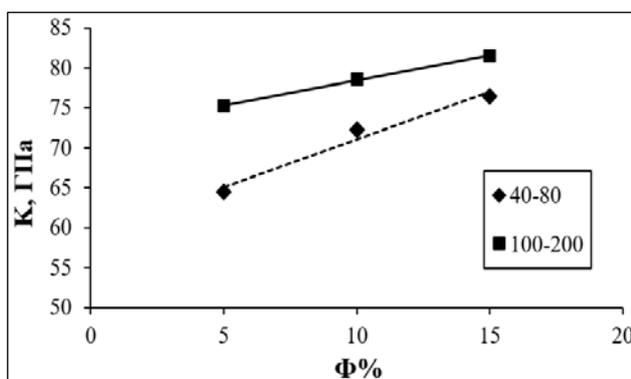
На рис.4 приведены зависимости модулей сдвига, Юнга и объемного модуля от объемного содержания армирующих частиц.



а



б

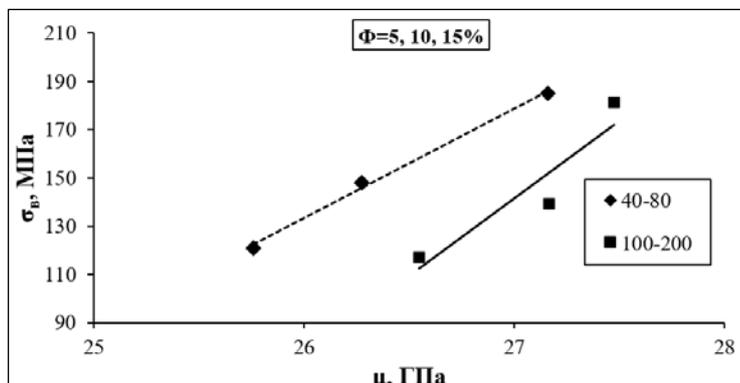


в

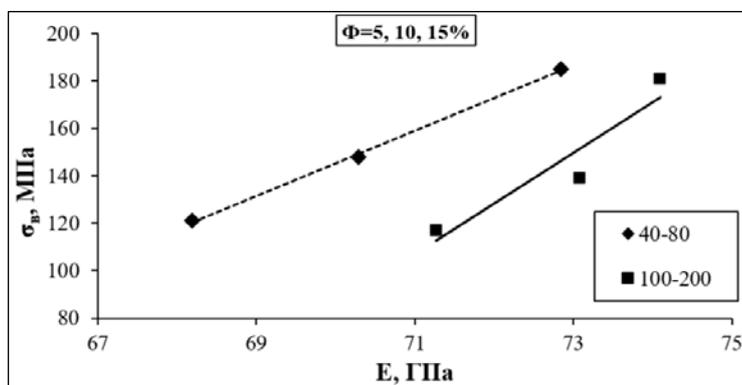
Рис.4. Зависимости модулей сдвига (а), Юнга (б) и объемного модуля (в) от содержания армирующих частиц.

На рис.5 приведена связь предела прочности σ_b с модулями сдвига (а), Юнга (б) и объемным модулем (в). Коэффициент корреляции временного сопротивления

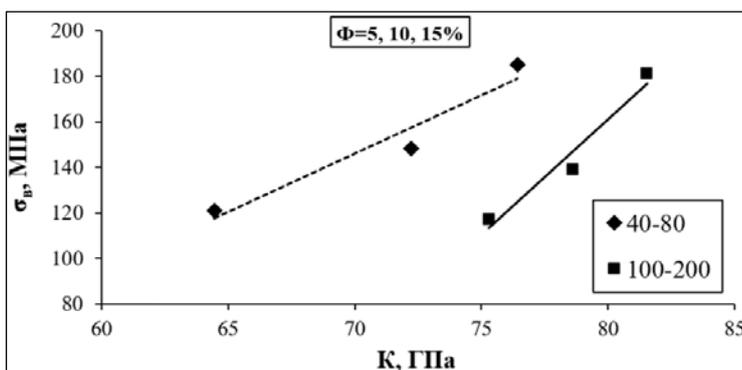
разрушению с модулями упругости, при разной объемной доли армирующих частиц, составляет не менее 0,9.



а



б



в

Рис.5. Связь предела прочности σ_b с модулями сдвига (а), Юнга (б) и объемным модулем (в).

Связь модулей упругости с пределом прочности хорошо описывается линейной зависимостью

$$\sigma_b = k_0 + k_1 * M. \quad (10)$$

Значения коэффициентов k_0 , k_1 для исследуемых материалов приведены в таблице 1. В выражении (10) σ_b в МПа, модули M в ГПа.

Таблица 1.

| Модули | Размер частиц, мкм | k_0 , МПа | k_1 |
|--------|-----------------------|-------------|-------|
| μ | 40-80 | -1043,2 | 45,2 |
| | 100-200 | -1593,8 | 64,2 |
| К | 40-80 | -212,24 | 5,1 |
| | 100-200 | -653,35 | 10,2 |
| Е | 40-80 | -818,7 | 13,8 |
| | 100-200 | -1411,4 | 21,4 |

Как видно из рис.5, при равной прочности композитов с размерами частиц 100-200 мкм и 40-80 мкм модули упругости этих материалов существенно отличаются. Модули упругости материала с частицами 100-200 мкм выше, чем композита с частицами 40-80 мкм, разница достигает 17%. Величина модулей матрицы составляет: $\mu_M = 25,5$ ГПа; $K_M = 63,3$ ГПа; $E_M = 67,5$ ГПа.

В таблице 2 приведены значения эффективных модулей армирующих частиц, рассчитанных с помощью уравнения (7).

Таблица 2.

| Размер частиц, мкм | $\mu_{\text{Аэф}}$, ГПа | $K_{\text{Аэф}}$, ГПа | $E_{\text{Аэф}}$, ГПа |
|-----------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| 40-80 | 34,3 | 101,4 | 92,5 |
| 100-200 | 37,8 | 158,2 | 106,4 |

Данные приведенные в таблице 1 и таблице 2, показывают, что эффективные упругие модули армирующих частиц существенно выше, чем модули матрицы материала (сплав А6). Модули сдвига армирующих частиц отличаются от модулей матрицы на 33% (частицы 40-80 мкм) и на 38% для частиц 100-200 мкм, модули объемно сжатия на 60 и 150% и модули Юнга на 37 и 58% соответственно. Увеличение модулей композита при повышении объемного содержания армирующих частиц (рис.4) связано с существенным отличием упругих модулей матрицы и армирующих частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что скорости распространения продольных и поперечных упругих волн увеличиваются по линейному закону с ростом плотности алюмоматричного композиционного материала, созданного на основе сплава А6 содержащего алюмосиликатные зольные микросферы размерами 40-80 мкм и 100-200 мкм. По данным измерения скоростей упругих волн были рассчитаны модули: Юнга, модуль сдвига, и объемного сжатия матрицы материала и в приближении Фойгта, определены модули армирующих частиц. Получено, что модули сдвига армирующих частиц отличаются от модулей матрицы на 33% (частицы 40-80 мкм) и на 38% для частиц 100-200 мкм, модули объемного сжатия на 60 и 150% и модули Юнга на 37 и 58% соответственно. Получен, высокий коэффициент корреляции предела прочности с модулями упругости при изменении объемной доли армирующих частиц. Это объясняется тем, что прочностные свойства микросфер и упругие характеристик микрочастиц взаимосвязаны, что отражается на величине предела прочности композита в целом и его упругих

свойствах. Полученные данные показывают, что определение упругих характеристик ультразвуковым методом позволит оценить прочностные свойства композита без его разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышов Е.А., Романов А.Д., Каверин Б.С., Варюхин В.А., Обьедков А.М., Семенов Н.М. *Разработка технологии получения композиционного материала на основе алюминия, упрочненного полыми керамическими микросферами* // *Металлург.* – 2018. – №12. – С.50-53.
2. Романов А.Д., Романова Е.А., Чернышов Е.А., Обьедков А.М., Семенов Н.М., Каверин Б.С., Вилков И.В. *Получение алюмоматричного композиционного материала, упрочненного полыми керамическими микросферами* // *Металлург.* – 2021. – №3. – С.68-72.
3. Клюев В.В. *Неразрушающий контроль и диагностика: справочник.* – М.: Машиностроение, 1995. – 488 с.
4. Burrascano P., Callegari S., Montisci A., Ricci M., Versaci M. *Ultrasonic nondestructive evaluation systems industrial application issues.* – Springer Cham., 2015. – 324 p.
5. 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. – Vol.168. – No.4. – 103567.
6. Kurashkin K.V., Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. *Use of texture-dependent ultrasonic parameter as indicator of degradation of hot-rolled thin-sheet steel under uniaxial tension* // *Journal of Nondestructive Evaluation.* – 2022. – Vol.41. – No.2. – 46.
7. Алешин Н.П. *Методы акустического контроля металлов.* – М.: Машиностроение, 1989. – 456 с.
8. Шермергор Д.Т. *Теория упругости микронеоднородных сред.* – М.: Наука, 1977. – 399 с.

REFERENCES

1. Chernyshov E.A., Romanov A.D., Kaverin B.S., Varyukhin V.A., Obedkov A.M., Semenov N.M. *Razrabotka tekhnologii polucheniya kompozitsionnogo materiala na osnove alyuminiya, uprochnennogo polymi keramicheskimi mikrosferami [Development of technology for obtaining composite material based on aluminum reinforced with hollow ceramic microspheres].* *Metallurg*, 2018, No.12, Pp.50-53.
2. Romanov A.D., Romanova E.A., Chernyshov E.A., Obedkov A.M., Semenov N.M., Kaverin B.S., Volkov I.V. *Poluchenie alyumomatrichnogo kompozitsionnogo materiala, uprochnennogo polymi keramicheskimi mikrosferami [Obtaining an aluminum matrix composite material reinforced with hollow ceramic microspheres].* *Metallurg*, 2021, No.3, Pp.68-72.
3. Klyuev V.V. *Nerazrushayushhij kontrol' i diagnostika: spravochnik [Non-destructive testing and diagnostics: handbook].* Moskva, Mashinostroenie, 1995, 488 p.

4. Burrascano P., Callegari S., Montisci A., Ricci M., Versaci M. *Ultrasonic nondestructive evaluation systems industrial application issues*. Springer Cham, 2015, 324 p.
5. 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, Vol.168, No.4, 103567.
6. Kurashkin K.V., Gonchar A.V., Klyushnikov V.A., Mishakin V.V. *Use of texture-dependent ultrasonic parameter as indicator of degradation of hot-rolled thin-sheet steel under uniaxial tension*. Journal of Nondestructive Evaluation, 2022, Vol.41, No.2, 46.
7. Aleshin N.P. *Metody akusticheskogo kontrolya metallov [Methods of acoustic control of metals]*. Moskva, Mashinostroenie, 1989, 456 p.
8. Shermergor D.T. *Teoriya uprugosti mikroneodnorodnykh sred [Theory of elasticity of micro-homogeneous media]*. Moskva, Nauka, 1977, 399 p.

Поступила в редакцию 19 сентября 2023 года.

Сведения об авторах:

Гончар Александр Викторович – к.т.н., н.с., ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: ndt@ipmran.ru

Мишакин Василий Васильевич – д.т.н., с.н.с., ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: ndt@ipmran.ru

Романова Елена Анатольевна – асп., м.н.с., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: nil_st@nntu.ru

Романов Алексей Дмитриевич – асп., м.н.с., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: nil_st@nntu.ru

Курашкин Константин Владимирович – к.т.н., н.с., ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН», г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: ndt@ipmran.ru

Соловьев Александр Александрович – инж., Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: solovev.aa@nntu.ru