

УДК 534.08; 669.018.715

ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЛОКАЛЬНОГО МОДУЛЯ ЮНГА ОТ ПОРИСТОСТИ ИЗОТРОПНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА УЛЬТРАЗВУКА

А. А. Карабутов, Н. Б. Подымова*, Е. Б. Черепецкая**

Международный учебно-научный лазерный центр Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва

* Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991 Москва

** Московский государственный горный университет, 119991 Москва

E-mail: npodymova@mail.ru

Предложен и экспериментально реализован лазерный оптико-акустический метод анализа влияния пористости на локальный модуль Юнга изотропных композитных материалов. На примере образцов металлматричного композита на основе силумина с добавлением упрочняющих микрочастиц карбида кремния SiC в различной концентрации показано, что для обеспечения эффективного возрастания модуля Юнга при увеличении концентрации SiC пористость готового образца не должна превышать 2 %.

Ключевые слова: изотропные композитные материалы, пористость, модуль Юнга, лазерный оптико-акустический метод.

Введение. Производство композитных материалов (КМ) является перспективным направлением получения конструкционных материалов с улучшенными упругими и прочностными характеристиками. Однако, поскольку такие материалы имеют гетерофазную структуру, они могут обладать некоторой пористостью (объемной концентрацией газовых пор) уже при изготовлении. При усталостных изменениях структуры материала в процессе эксплуатации изделий из КМ может происходить увеличение пористости [1]. Известно, что пористость оказывает существенное влияние на упругие и прочностные свойства конструкционных материалов (см., например, [2, 3]). Возникновение пористости в процессе литейного производства металлматричных КМ может привести к тому, что упругие модули полученного материала будут меньше, чем у исходной матрицы, даже при увеличении концентрации высокомодульных армирующих частиц [4]. Таким образом, разработка оперативных неразрушающих методов количественной оценки влияния пористости на упругие модули КМ имеет большое практическое значение (совершенствование технологии изготовления КМ, оценка остаточного ресурса материала в процессе эксплуатации изделий и т. д.).

Традиционно упругие модули КМ измеряются с помощью механических статических методов (растяжение или сжатие) и динамических методов на основе измерений резонансных частот собственных колебаний образцов. Однако эти методы можно использовать для исследования образцов определенной геометрии, например стержневых прямоугольных об-

разцов с фиксированным соотношением продольного и поперечного размеров. Кроме того, механические методы не позволяют измерить локальные упругие модули КМ, имеющих существенно неоднородную структуру.

Известно, что упругие свойства материала влияют на фазовые скорости распространяющихся в нем акустических волн. Поэтому в настоящее время достаточно широко используются ультразвуковые методы определения упругих модулей конструкционных материалов по измеренным значениям фазовых скоростей продольных и поперечных (сдвиговых) акустических волн [2, 5–7]. Данные методы являются оперативными, могут применяться при испытании образцов, имеющих произвольные форму и размеры, и позволяют проводить измерения в областях, размер которых не превышает нескольких миллиметров.

В ряде работ предложены теоретические модели и выполнены экспериментальные ультразвуковые исследования зависимости упругих модулей металлов и сплавов от пористости (см., например, работы [2, 5] и библиографию к ним). Предлагаемые в этих работах теоретические подходы созданы для однокомпонентных пористых металлов и керамик с известным распределением пор по размерам, что затрудняет применение данных подходов для гетерофазных КМ. Кроме того, композиты являются акустически неоднородными материалами, что обусловлено различием акустических свойств их компонентов и большим разбросом характерных масштабов структурных неоднородностей (от нескольких единиц до сотен микрометров). Вследствие этого в ультразвуковом диапазоне частот значения коэффициента затухания акустических волн в КМ являются достаточно большими [6]. Поэтому для обеспечения достоверной диагностики образцов толщиной несколько сантиметров амплитуда зондирующих ультразвуковых импульсов должна составлять десятки мегапаскалей в частотном диапазоне от долей до десятков мегагерц. В этом случае применение традиционных систем с пьезоэлектрическими излучателями нецелесообразно вследствие низкой эффективности пьезовозбуждения широкополосных акустических сигналов [8].

Целью настоящей работы является разработка и реализация импульсного акустического метода количественной оценки влияния пористости на локальный модуль Юнга изотропных композитных материалов с использованием лазерного источника ультразвука. Метод основан на лазерном термооптическом способе возбуждения ультразвука [9, 10] и измерении фазовых скоростей продольных и сдвиговых акустических волн в образцах. Основное преимущество этого метода по сравнению с традиционными ультразвуковыми методами исследований заключается в возможности эффективного возбуждения коротких и мощных зондирующих акустических импульсов, необходимых для достоверной диагностики сильно поглощающих и рассеивающих ультразвук неоднородных КМ.

1. Методика расчета модуля Юнга изотропного композитного материала.

Пористость P образца КМ — объемная концентрация газовых пор, осредненная по его объему, — определяется по формуле (см., например, [2])

$$P = (1 - \rho/\rho_0) \cdot 100 \%, \quad (1.1)$$

где ρ — плотность образца, вычисляемая по известному объему образца и результатам его гидростатического взвешивания или взвешивания в воздухе; ρ_0 — расчетная плотность твердой фазы образца, определяемая по известным плотностям матрицы ρ_m и наполнителя ρ_f и их объемным концентрациям n_m и n_f в этом образце:

$$\rho_0 = n_m \rho_m + n_f \rho_f. \quad (1.2)$$

Согласно теории упругости расчет модуля Юнга E_0 изотропного композита без пор (значение P равно нулю) проводится по формуле

$$E_0 = \rho_0 c_S^2 \frac{3c_{L_0}^2 - 4c_S^2}{c_{L_0}^2 - c_S^2}, \quad (1.3)$$

где ρ_0 вычисляется по формуле (1.2); c_{L0} — теоретически рассчитанное значение фазовой скорости продольных акустических волн в КМ без пор; c_S — измеренное значение фазовой скорости сдвиговых акустических волн в исследуемом образце. Возможность использования экспериментально полученного значения c_S для расчета модуля Юнга обусловлена тем, что наличие пор не влияет на сдвиговую жесткость образца, а уменьшение c_S за счет рассеяния сдвиговых волн на порах при достаточно малых величинах пористости (менее 5 %) можно не учитывать [2]. Для расчета c_{L0} предлагается использовать модель распространения продольных акустических волн в двухфазной (двухкомпонентной) среде [11]:

$$c_{L0}^2 = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{n_m}{\rho_m c_{Lm}^2} + \frac{n_f}{\rho_f c_{Lf}^2} \right)^{-1}. \quad (1.4)$$

Здесь фазовые скорости продольных акустических волн в матрице c_{Lm} и наполнителе c_{Lf} композита считаются известными.

Значения модуля Юнга исследуемых образцов вычисляются по формуле (1.3) с заменой ρ_0 и c_{L0} на измеренные значения плотности ρ и фазовой скорости продольных акустических волн c_L для каждого образца КМ.

2. Лазерный оптико-акустический метод измерения фазовых скоростей продольных и сдвиговых ультразвуковых волн в изотропном композите. Лазерные источники ультразвука позволяют получать акустические сигналы малой длительности, что обеспечивает высокую точность измерения времени пробега акустической волны даже при малой толщине образцов (порядка нескольких миллиметров). Ультразвуковой пучок с характерным диаметром порядка нескольких миллиметров дает возможность создавать и соответственно измерять фазовую скорость поперечных (сдвиговых) акустических волн.

2.1. Лазерная оптико-акустическая система. Схема лазерной оптико-акустической системы показана на рис. 1. Импульс Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности поглощается в специальном оптико-акустическом (ОА) источнике, что приводит к неоднородному нестационарному нагреву приповерхностного слоя источника и возникновению в нем упругих механических напряжений [9]. Эти напряжения обуславливают возникновение импульса давления — ультразвукового импульса продольных акустических волн (ОА-сигнала). При использовании импульсных лазеров с модуляцией добротности амплитуда ОА-сигналов $U_{ОА}$ может достигать десятков мегапаскалей, а их спектр составляет от долей до сотен мегагерц.

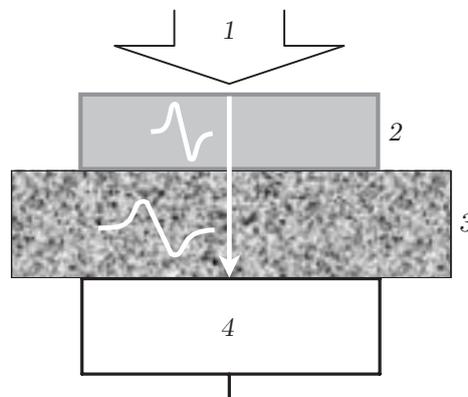


Рис. 1. Схема лазерной оптико-акустической системы для измерения модуля Юнга изотропных композитных материалов:

1 — поглощаемый лазерный импульс, 2 — оптико-акустический источник, 3 — исследуемый образец композита, 4 — пьезоэлектрический приемник

Таблица 1

Параметры исследуемых образцов КМ

Номер образца	H , мм	n		ρ_0 , кг/м ³	ρ , кг/м ³	P , %
		AK12M2MgH	SiC			
1	11,20	1,00	0	2,74	2,72	0,7
2	10,20	0,97	0,03	2,75	2,71	1,5
3	7,85	0,93	0,07	2,77	2,67	3,6
4	4,75	0,86	0,14	2,80	2,67	4,6

Возбуждаемый в ОА-источнике ультразвуковой импульс — зондирующий (или опорный) сигнал — распространяется в исследуемом образце и регистрируется с помощью широкополосного пьезоэлектрического приемника, имеющего акустический контакт с образцом (см. рис. 1). Для обеспечения такого контакта ОА-источник, образец и пьезоприемник разделяются слоями иммерсионной жидкости, в данном случае — дистиллированной воды (на рис. 1 не показаны), и монтируются в кювету, представляющую собой оптико-акустическую измерительную ячейку. Размер области тестирования в поперечном направлении определяется поперечным размером излучаемого ультразвукового пучка, равным характерному диаметру лазерного пучка. Электрические сигналы с пьезоприемника подаются на двухканальный цифровой запоминающий осциллограф типа Tektronix, момент запуска осциллографа синхронизирован с моментом излучения лазерного импульса. Отношение сигнал-шум регистрируемых электрических сигналов составляет $50 \div 60$ дБ. Лазерная ОА-система имеет следующие характеристики: рабочий частотный диапазон — $0,2 \div 50,0$ МГц, амплитуда давления ультразвуковых импульсов — $0,01 \div 10,00$ МПа, толщина образцов — $0,1 \div 70,0$ мм, размер области тестирования в поперечном направлении — $1 \div 2$ мм.

2.2. *Исследованные образцы композитных материалов.* Исследовались образцы композитов на основе матрицы из сплава АК12М2МгН (силумина), дисперсно-армированного частицами карбида кремния SiC со средним диаметром 14 мкм и различной объемной концентрацией. Образцы были изготовлены литейным способом: определенное количество частиц наполнителя механически замешивалось в матричный расплав, который затем остывал без принудительного удаления газовой фазы [12].

Плотность твердой фазы каждого образца ρ_0 вычислялась с использованием выражения (1.2) по известным плотности наполнителя $\rho_{\text{SiC}} = 3200$ кг/м³ [13], плотности матрицы-силумина $\rho_A = 2740$ кг/м³ и по заданным объемным концентрациям матрицы n_A и наполнителя n_{SiC} . Плотность силумина рассчитывалась по известным плотностям и массовым концентрациям составляющих этого сплава. Плотность каждого образца ρ вычислялась по измеренной простым взвешиванием в воздухе массе и рассчитанному объему. Соответственно пористость каждого образца P , осредненная по его объему, определялась по формуле (1.1). Параметры исследованных образцов КМ приведены в табл. 1. Из табл. 1 следует, что с увеличением концентрации наполнителя SiC осредненная пористость образца возрастает. По-видимому, это обусловлено особенностями технологии изготовления материала (неоднородное армирование) [12]. По той же причине локальная пористость на разных участках одного и того же образца может быть различной, что оказывает влияние на локальный модуль Юнга. Поскольку пористость исследованных образцов не превышает 5 %, при расчете модуля Юнга в композите без пор по формуле (1.3) допустимо использовать измеренное значение фазовой скорости сдвиговых акустических волн в образце (см. п. 1).

Все исследованные образцы представляли собой плоскопараллельные диски диаметром 40 мм, поверхности которых шлифовались с помощью абразивного порошка корунда

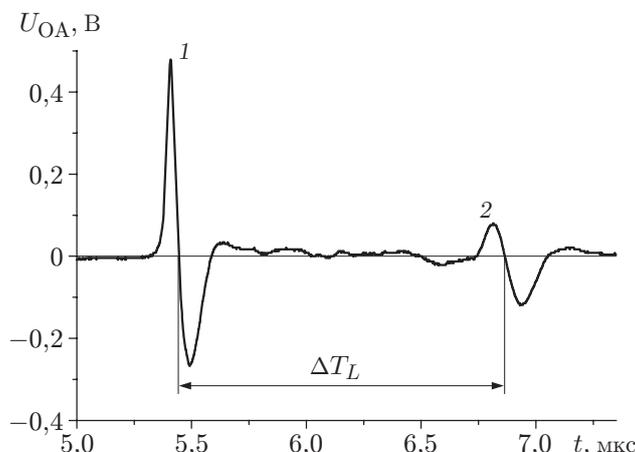


Рис. 2. Типичная временная форма импульса продольных акустических волн: 1 — импульс, однократно прошедший через образец металломатричного КМ, 2 — импульс, трижды прошедший через тот же образец

со средним диаметром частиц, равным 20 мкм. Следует отметить, что в образцах с таким соотношением толщины и диаметра невозможно создать строго одноосное напряжение, необходимое для измерения модуля Юнга с помощью механического метода растяжения или сжатия.

Механические и акустические свойства полученных образцов КМ позволяли считать эти образцы изотропными, поскольку форма частиц наполнителя является квазисферической и частицы распределены по объему каждого образца практически однородно [12]. Поэтому величины фазовых скоростей продольных и сдвиговых акустических волн считались не зависящими от направления распространения волны в образце.

2.3. Измерение фазовых скоростей. При отсутствии существенной дисперсии фазовой скорости продольных акустических волн в изотропных КМ (когда относительное изменение скорости в исследуемом частотном диапазоне не превышает 5 %) абсолютное значение этой скорости определяется по формуле

$$c_L = 2H/\Delta T_L, \quad (2.1)$$

где H — толщина исследуемого образца; ΔT_L — разность времен прихода на пьезоприемник ультразвукового импульса, однократно прошедшего через образец, и импульса, трижды прошедшего через образец и отразившегося от границ раздела между образцом и слоями иммерсионной жидкости. Такой метод измерения фазовой скорости называется времяпролетным. На рис. 2 представлена типичная временная форма импульса продольных акустических волн, прошедшего через образец 4 композита на основе силумина с добавлением частиц карбида кремния (см. табл. 1), и импульса, трижды прошедшего через этот образец.

Импульс, трижды прошедший через образец КМ, сильно рассеивающий ультразвук, может иметь очень малую амплитуду и не регистрироваться на фоне электрических шумов. Для таких образцов абсолютное значение фазовой скорости продольных акустических волн может быть вычислено по формуле $c_L = H/\Delta T'_L$, где $\Delta T'_L$ — разность времен прихода на пьезоприемник ультразвукового импульса, однократно прошедшего образец, и опорного импульса ОА-источника.

Интервал ΔT_L (или $\Delta T'_L$) измеряется по моментам перехода сигналов через нуль от фазы сжатия (положительная полуволна) к фазе разрежения (отрицательная полуволна). Поскольку затухание ультразвука в образце влияет на длительность полуволн и сравниваемые сигналы проходят различное расстояние в образце, длительность их полуволн будет

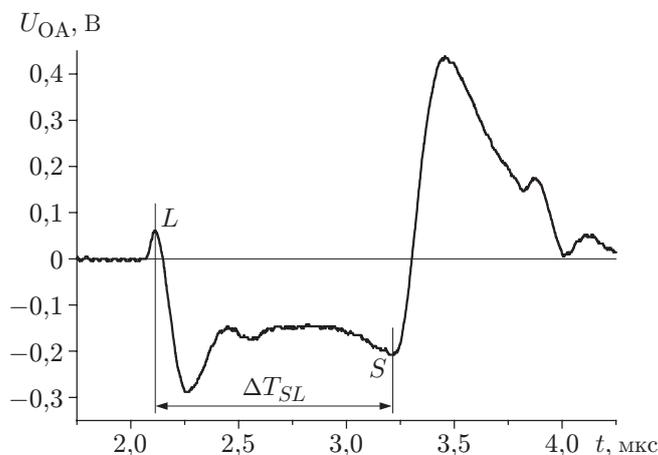


Рис. 3. Типичная временная форма акустического сигнала, возбуждаемого при поглощении лазерного импульса в образце металломатричного КМ:

L — импульс продольных ультразвуковых волн, S — импульс сдвиговых (поперечных) ультразвуковых волн

различной (см. рис. 2). Из теоретической модели распространения широкополосных ОА-сигналов в поглощающей среде [9] следует, что при отсутствии существенной дисперсии наиболее близкой к фазовой скорости волны будет скорость движения “нулевой” точки временного профиля двухполярного импульса.

Измерения фазовой скорости поперечных (сдвиговых) акустических волн c_S проводятся с использованием оптико-акустического метода при поглощении лазерного импульса в исследуемом образце. На рис. 3 представлена временная форма ультразвукового сигнала, возбуждаемого при поглощении лазерного импульса в образце 3 композита на основе силумина с добавлением частиц карбида кремния (см. табл. 1). При этом повреждения поверхности образца не происходит. Возбуждаемый импульс продольных волн L является однополярным (сжатие), фаза разрежения возникает вследствие дифракции ультразвука в образце. Импульс сдвиговых акустических волн возбуждается при отражении импульса L от облучаемой акустически свободной поверхности образца (граница воздух — образец). Регистрируемая форма волны S (см. рис. 3) определяется акустическим полем сдвиговой волны, трансформируемой в продольную при переходе из образца в иммерсионную жидкость. При этом на форму волны S влияют направленность сдвиговой волны, определяемая поперечным размером пучка продольных волн L , зависимость коэффициента трансформации от угла падения сдвиговой волны на границу раздела образец — иммерсионная жидкость, а также конечность апертуры пьезоприемника. Поэтому регистрируемый импульс S , определяемый сдвиговой волной, сильно растянут по сравнению с импульсом продольных волн L , а момент прихода отрицательного пика сигнала S определяется временем распространения сдвиговой волны по образцу. Импульс, следующий после этого сигнала (см. рис. 3), представляет собой импульс продольных волн L , отражающихся в слое иммерсионной жидкости между образцом и пьезоприемником.

По измеренной разности ΔT_{SL} времен прихода на пьезоприемник максимума импульса L и минимума импульса S и по измеренной фазовой скорости продольных акустических волн c_L определяется фазовая скорость сдвиговых волн в образце (при отсутствии существенной дисперсии)

$$c_S = \frac{H}{\Delta T_{SL} + H/c_L}. \quad (2.2)$$

Таблица 2

Результаты оптико-акустических измерений и справочные данные для алюминия и меди

Материал	Данные ОА-измерений			Данные [14]		
	c_L , м/с	c_S , м/с	E , ГПа	c_L , м/с	c_S , м/с	E , ГПа
Al	6280 ± 40	3130 ± 50	71 ± 4	6260	3080	$69 \div 72$
Cu	4720 ± 30	2250 ± 40	123 ± 7	4700	2260	$110 \div 130$

Таблица 3

Результаты оптико-акустических измерений модуля Юнга исследованных образцов КМ

Номер образца	E_1 , ГПа	E_2 , ГПа
1	83 ± 5	84 ± 5
2	84 ± 5	84 ± 5
3	83 ± 5	83 ± 5
4	80 ± 5	84 ± 5

Малая длительность импульсов продольных и сдвиговых волн и четкая локализация “реперных” точек на временном профиле импульсов, по которым определяются времена пробега сигналов в образце, обеспечивают достаточно малую относительную погрешность времяпролетных измерений фазовых скоростей: приблизительно 0,5 % для продольных волн и примерно 2 % для сдвиговых волн. Для продольных ультразвуковых волн точность измерений определяется в основном максимальной относительной погрешностью измерения толщины образцов. Для сдвиговых ультразвуковых волн относительная погрешность зависит от точности измерения значения ΔT_{SL} , т. е. от локализации минимума импульса S (см. рис. 3).

Таким образом, в применяемом лазерном оптико-акустическом методе максимальная относительная погрешность измерения модуля Юнга определяется в основном точностью измерения фазовых скоростей продольных и сдвиговых акустических волн и составляет $5 \div 6$ % (с учетом погрешности определения плотности образцов).

В качестве тестовых образцов были исследованы образцы алюминия и меди (плотности 2690 и 8960 кг/м³ соответственно). В табл. 2 для этих образцов приведены результаты оптико-акустических измерений фазовых скоростей продольных и сдвиговых акустических волн и рассчитанные по ним значения модуля Юнга E . Для сравнения представлены справочные данные для алюминия и меди [14]. Из табл. 2 следует, что в пределах точности измерений результаты экспериментов хорошо согласуются с данными [14]. Это свидетельствует о достоверности результатов измерений, получаемых с помощью лазерного оптико-акустического метода.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение. Для всех исследованных образцов частотные вариации фазовой скорости продольных акустических волн в рабочем спектральном диапазоне не превышали $2 \div 3$ %, поэтому значение c_L на исследованных участках всех образцов определялось по формуле (2.1). Поскольку импульсы возбуждаемых сдвиговых волн являются более низкочастотными по сравнению с импульсами продольных волн (см. рис. 3), дисперсия фазовой скорости сдвиговых волн в образцах не учитывалась и ее абсолютное значение определялось по формуле (2.2).

В табл. 3 представлены результаты оптико-акустических измерений локального модуля Юнга в центре (E_1) и на периферии (E_2) каждого образца КМ. Поскольку в пределах погрешности измерений значения E_1 и E_2 одинаковы (за исключением значения E_1 для образца 4, имеющего наибольшую пористость), далее использовались средние значения модуля Юнга образцов $E = (E_1 + E_2)/2$.

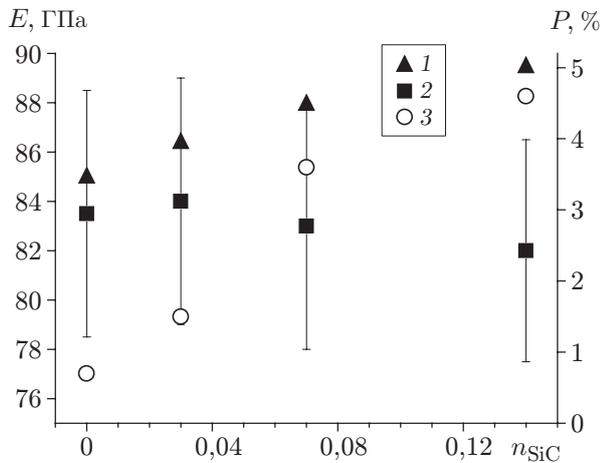


Рис. 4

Рис. 4. Зависимости модуля Юнга (1, 2) и пористости (3) образцов КМ на основе силумина от объемной концентрации наполнителя SiC:

1 — результаты расчета по формуле (1.3); 2 — результаты измерений

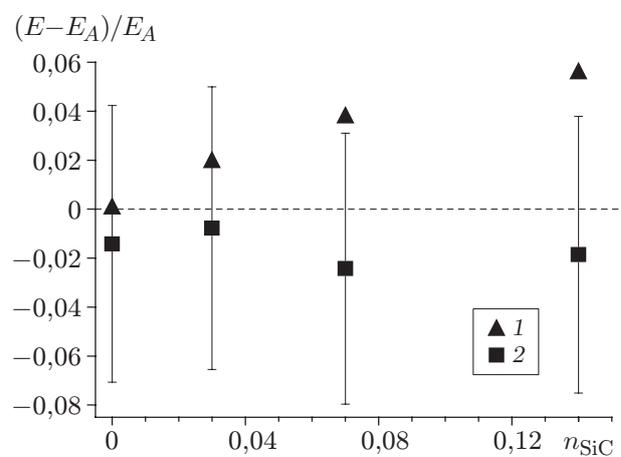


Рис. 5

Рис. 5. Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимости изменения модуля Юнга композита относительно его значения для силумина от объемной концентрации наполнителя SiC

На рис. 4 представлены результаты расчетов по формуле (1.3) с учетом (1.4) и оптико-акустических измерений средних значений модуля Юнга E в зависимости от объемной концентрации частиц карбида кремния n_{SiC} . Фазовая скорость продольных акустических волн в наполнителе равна $c_{L_{SiC}} = 11\,800$ м/с [13], а фазовая скорость в матрице-силумине, вычисленная по измеренным значениям c_L и P для образца 1 с использованием модели пористого металла [15], — $c_{L_A} = 6860$ м/с. На рис. 4 представлена также зависимость пористости P образца от величины n_{SiC} . Видно, что с увеличением концентрации карбида кремния значения упругих модулей, вычисленные по формуле (1.3), возрастают, однако при этом увеличивается и пористость материала. Это приводит к тому, что модуль Юнга полученного КМ оказывается практически таким же, как у исходной матрицы, т. е. при добавлении высокомодульных частиц наполнителя упрочнения материала не происходит. На рис. 5 представлена зависимость изменения модуля Юнга КМ относительно его значения E_A для силумина от концентрации наполнителя n_{SiC} . Результаты расчета показывают, что добавление частиц карбида кремния с объемной концентрацией 14 % должно приводить к увеличению модуля Юнга практически на 6 % по сравнению с модулем Юнга исходной матрицы, однако этого не происходит вследствие увеличения пористости материала.

На рис. 6 показана зависимость от пористости композита изменения модуля Юнга $\Delta E = (E - E_0)/E_0$ относительно его расчетного значения (1.3) для данного типа КМ. Штриховая линия $E = E_0$ соответствует значению пористости $P = 0$. Для образцов 1 и 2 ($P < 2\%$) в пределах погрешности измерений значение модуля Юнга совпадает с соответствующим значением, вычисленным по формуле (1.3). Видно, что при пористости образца $P \approx 5\%$ уменьшение модуля Юнга относительно расчетного значения составляет 8 %.

Таким образом, для обеспечения увеличения модуля Юнга КМ на основе силумина АК12М2МгН с увеличением объемной концентрации наполнителя SiC при его механическом замешивании в матричный расплав пористость готового образца не должна превышать 2 %.

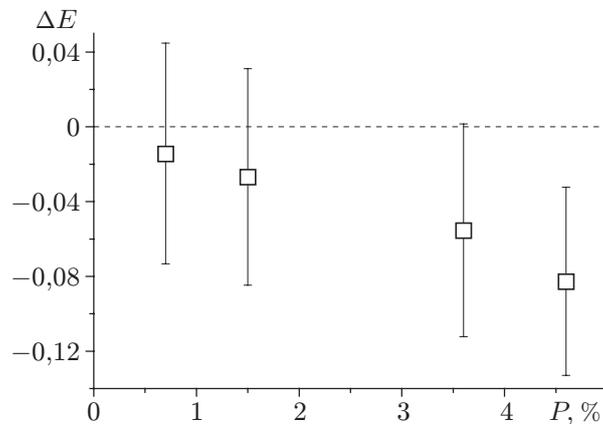


Рис. 6. Зависимость изменения модуля Юнга композита относительно его расчетного значения от пористости образца

Заключение. В работе предложен и экспериментально реализован импульсный акустический метод количественной оценки совместного влияния пористости и концентрации дисперсного наполнителя на локальный модуль Юнга изотропных металломатричных КМ с использованием лазерного источника ультразвука. Данный метод позволяет проводить неразрушающие измерения модуля Юнга в образцах толщиной $0,1 \div 70,0$ мм с размером области тестирования в поперечном направлении $1 \div 2$ мм. Максимальная относительная погрешность измерений составляет 6 %. Для исследованного КМ на основе силумина с добавлением упрочняющих микрочастиц карбида кремния SiC определено максимальное значение пористости готового образца, при превышении которого влияние пористости на уменьшение модуля Юнга оказывается более существенным, чем влияние наполнителя на возрастание этого модуля.

Разработанный лазерный оптико-акустический метод позволяет осуществлять неразрушающую локальную диагностику акустических и механических свойств КМ. Такая диагностика, необходимая на этапе отработки и совершенствования технологии изготовления материала, позволяет выявлять в материале области с меньшей прочностью до начала процесса изготовления деталей и изделий. Данный метод может также применяться при экспериментальном исследовании влияния состава, размеров и концентрации упрочняющих наполнителей на упругие свойства композитных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mileiko S. T. Metal and ceramic based composites. Amsterdam: Elsevier, 1997.
2. Поляков В. В., Головин А. В. Упругие характеристики пористых материалов // ПМТФ. 1993. Т. 34, № 5. С. 32–35.
3. Акимов В. В., Акимов М. В., Корытов М. С., Пластинина М. В. Влияние пористости на упругие характеристики твердых сплавов TiC–TiNi // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 4. С. 136–138.
4. Подымова Н. Б., Карабутов А. А., Павлин С. В. и др. Измерение упругих модулей дисперсно-наполненных композиционных материалов лазерным оптико-акустическим методом // Физика и химия обраб. материалов. 2011. № 2. С. 78–87.
5. Maitra A. K., Phani K. K. Ultrasonic evaluation of elastic parameters of sintered powder compacts // J. Mater. Sci. 1994. V. 29. P. 4415–4419.
6. Jeong H., Hsu D. K. Experimental analysis of porosity-induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites // Ultrasonics. 1995. V. 33, N 3. P. 195–203.

7. Семухин Б. С., Зуев Л. Б., Бушмелева К. И. Скорость ультразвука в низкоуглеродистой стали, деформируемой на нижнем пределе текучести // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 3. С. 197–201.
8. Труэлл Р. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. М.: Мир, 1972.
9. Гусев В. Э. Лазерная оптоакустика / В. Э. Гусев, А. А. Карабутов. М.: Наука, 1991.
10. Иньков В. Н., Черепецкая Е. Б., Шкуратник В. Л. и др. Использование эффекта тепловой нелинейности при лазерном возбуждении ультразвуковых сигналов в геоматериалах // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 2. С. 179–186.
11. Жаркий С. М., Карабутов А. А., Пеливанов И. М. и др. Исследование слоев пористого кремния лазерным ультразвуковым методом // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 32, № 10. С. 485–489.
12. Чернышова Т. А., Курганова Ю. А., Кобелева Л. И. и др. Композиционные материалы с матрицей из алюминиевых сплавов, упрочненных частицами, для пар трения скольжения // Конструкции из композиц. материалов. 2007. № 3. С. 38–48.
13. Давыдов С. Ю. Влияние давления на упругие свойства карбида кремния // Физика твердого тела. 2004. Т. 46, № 7. С. 1169–1173.
14. Физические величины: Справ. / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
15. Поляков В. В., Головин В. А. Влияние пористости на скорости ультразвуковых волн в металлах // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20, № 11. С. 54–57.

Поступила в редакцию 8/XI 2012 г.
