

Модуль Юнга и внутреннее трение биоморфного композита SiC/Si на основе биоматрицы дерева сапели

© Б.К. Кардашев, Т.С. Орлова, Б.И. Смирнов, A.R. de Arellano-Lopez*, J. Martinez-Fernandez*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

* Universidad de Sevilla,
Sevilla, Spain

E-mail: b.kardashev@mail.ioffe.ru, smir.bi@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 26 августа 2008 г.)

Исследовано влияние амплитуды колебательной деформации на модуль Юнга и поглощение ультразвука (внутреннее трение) биоморфного композита SiC/Si, полученного путем пиролиза дерева сапели с последующей инфильтрацией кремния. Исследования выполнены на воздухе и в вакууме акустическим резонансным методом составного вибратора при продольных колебаниях на частотах около 100 kHz. Установлено, что в био-SiC/Si на основе сапели наблюдается существенное влияние адсорбции-десорбции молекул, входящих в состав воздуха, на действующий модуль упругости и декремент упругих колебаний. Проведено сопоставление микропластических характеристик композитов SiC/Si, приготовленных на основе различных пород дерева.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-03-91353 ННФ_а), Программы Президиума РАН (П-03_02) и Министерства науки и технологии Испании (проект MAT 2003-05202-CO2-01).

PACS: 62.20.F-, 62.20.De, 81.40.Jj

1. Введение

В настоящей работе продолжены исследования [1–4], посвященные изучению упругих и неупругих свойств биоморфных композитов SiC/Si (био-SiC/Si), получаемых на основе различных пород дерева. Указанные композиты создаются путем инфильтрации расплавленного кремния в пористую углеродную матрицу, полученную в результате пиролиза дерева при высоких температурах [5].

Индивидуальная биологически сложная ячеистая структура дерева, содержащая вытянутые преимущественно вдоль направления роста дерева каналы, сохраняется после пиролиза и в биоуглеродной матрице. В ней наблюдаются два вида пустых каналов [6]: с большими поперечными размерами примерно от 30 μm (для бука) до 100 μm (для сапели) и с малыми размерами ($\sim 5\text{--}10\ \mu\text{m}$). Суммарно объемная доля всех пор составляет $\sim 37, 43$ и 66% соответственно для эвкалипта, бука и сапели. При этом матрица на основе сапели отличается тем, что в ней по сравнению с эвкалиптом и буком определяющую роль в пористости (более 80%) играют поры малого размера.

Окончательная структура композита SiC/Si представляет собой основу из кубического карбида кремния (3C-SiC), повторяющую характерную для каждого сорта дерева ячеистую канальную структуру, в которой карбид кремния, пустые каналы и каналы, заполненные избыточным кремнием, вытянуты вдоль направления роста дерева. Отмечается также присутствие небольшого количества оставшегося углерода (не более 7 wt.% [5]). Таким образом, в зависимости от типа дерева и техно-

логических условий инфильтрации Si можно получать разнообразные биоморфные композиты SiC/Si.

В связи с указанным обстоятельством представляло интерес проведение исследований упругих и неупругих свойств не изученных ранее композитов SiC/Si на основе биоматрицы сапели и сравнение полученных результатов с известными данными для подобных композитов на основе эвкалипта и бука [2–4].

2. Образцы и методика эксперимента

Образцы для акустических исследований имели форму прямоугольных стержней сечением $\sim 4 \times 4\ \text{mm}$ и длиной около 50 mm, ориентированных вдоль направления роста дерева. Измерения проводились резонансным методом составного пьезоэлектрического вибратора [7]. В образце испытуемого материала, приклеенном к кварцу, возбуждалась продольная стоячая волна. Длины полуволновых стержней исследуемого образца и кварцевого преобразователя подбирались так, чтобы резонансная частота колебаний составного вибратора равнялась $\sim 100\ \text{kHz}$. Измерения модуля Юнга E и декремента δ проводились последовательно при увеличении и уменьшении амплитуды колебательной деформации ϵ в диапазоне от $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ до $\sim 2 \cdot 10^{-4}$.

Процедура акустических измерений, как и в [2–4], была следующей. Вначале на свежеприготовленном образце, находившемся длительное время после изготовления на воздухе при атмосферном давлении и комнатной температуре, измерялись амплитудные зависимости $E(\epsilon)$ и $\delta(\epsilon)$. Затем составной вибратор (склеенные образец и кварц) помещался в вакуумную камеру. Все

последующие измерения $E(\varepsilon)$ и $\delta(\varepsilon)$ проводились в вакууме ($\sim 10^{-3}$ mm Hg) при комнатной температуре. Из зависимостей $E(\varepsilon)$ по схеме, предложенной в [8,9], строились кривые напряжение—микрoпластическая деформация. Подобные построения диаграмм акустического деформирования позволяют проводить наглядное сравнение микрoпластических свойств различных материалов.

3. Экспериментальные данные и обсуждение

На рис. 1 приведены амплитудные зависимости модуля Юнга E и декремента δ для образцов композита SiC/Si, приготовленного из сапели. В этих измерениях образец впервые после изготовления подвергался воздействию высоких амплитуд деформации. Видно, что при постепенном увеличении колебательной нагрузки на образец измеряемый модуль упругости заметно увеличивается, а затухание уменьшается (за исключением последних точек при больших ε , когда декремент начинает расти, а модуль падать). Изменения E и δ , возникшие при первом увеличении ε , являются необратимыми: при уменьшении ε ни модуль, ни декремент не возвра-

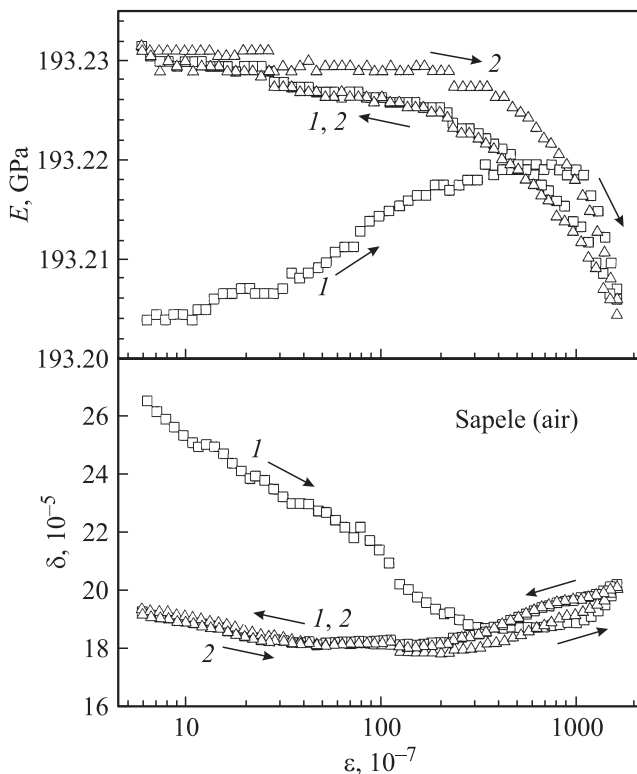


Рис. 1. Амплитудные зависимости модуля Юнга E и декремента δ для био-SiC/Si, измеренные на приготовленном из сапели образце последовательно два раза (1 — первое измерение, 2 — второе) с перерывом около 1 min. Измерения проводились на воздухе при атмосферном давлении. Стрелки показывают направления изменения ε . $T = 290$ К.

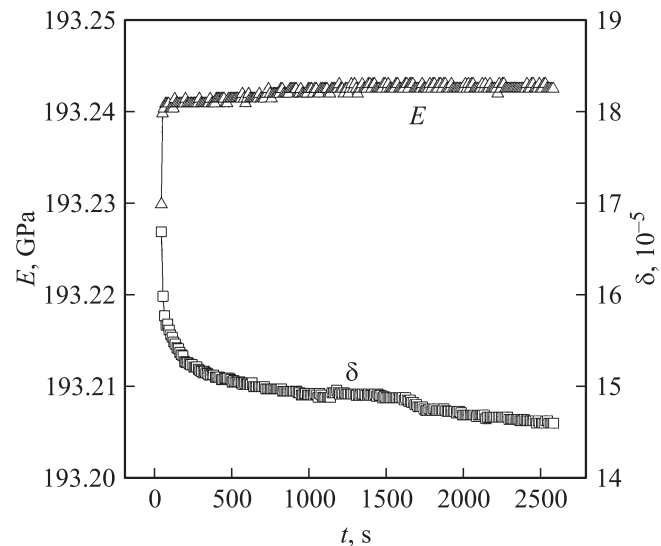


Рис. 2. Временные зависимости модуля Юнга E и декремента δ для образца SiC/Si, приготовленного из сапели. Измерения выполнены в вакуумной камере в процессе откачки $\varepsilon = 5.0 \cdot 10^{-7}$, $T = 290$ К.

щаются к исходным значениям. Повторные измерения $E(\varepsilon)$ и $\delta(\varepsilon)$ практически совпадают с зависимостями, полученными при уменьшении ε в первом измерении.

Рис. 2 демонстрирует поведение модуля Юнга E и декремента δ под откачкой в вакуумной камере. Из рисунка видно, что после резкого увеличения модуля и уменьшения декремента в первые секунды после начала откачки в дальнейшем имеют место уже монотонные изменения этих параметров в ту же сторону. Эти изменения, очевидно, вызваны десорбцией молекул воздуха из образца, обладающего заметной остаточной пористостью. По-видимому, эффекты увеличения модуля и уменьшения декремента под влиянием возрастающей амплитуды (рис. 1) также можно приписать процессу десорбции, который начинает проявляться при последовательном увеличении ε . Во время измерений амплитудных зависимостей в вакууме наблюдается похожее поведение $\delta(\varepsilon)$, что и на воздухе (ср. рис. 1 и 3). Несомненно, это связано с десорбцией молекул воздуха, оставшихся в образце после амплитудных воздействий на воздухе и вакуумной откачки. Подобные явления наблюдались ранее на композитах био-SiC/Si, изготовленных из эвкалипта и бука, а также на биоуглеродной матрице из эвкалипта [2–4].

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что и в композите био-SiC/Si, приготовленном из сапели, адсорбция-десорбция молекул, входящих в состав воздуха, также оказывает существенное влияние на действующий модуль упругости и декремент упругих колебаний. Десорбция, возникающая под действием высоких амплитуд, приводит к необратимым последствиям: увеличению модуля E и уменьшению декремента δ .

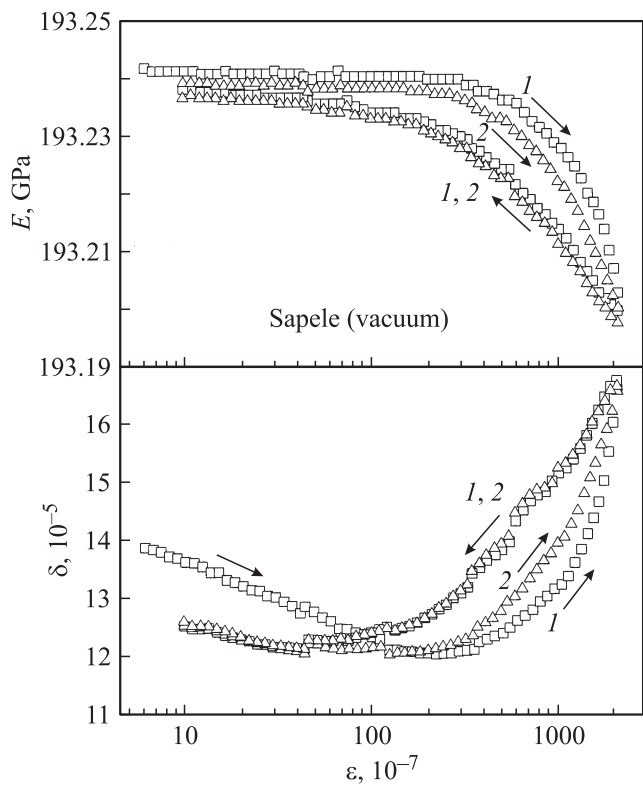


Рис. 3. Амплитудные зависимости модуля Юнга E и декремента δ для био-SiC/Si, измеренные на подготовленном из сапели образце последовательно два раза (1 — первое измерение, 2 — второе) с перерывом около 1 min. Измерения проводились в вакууме на образце, предварительно подвергнувшись воздействию высоких амплитуд. Стрелки показывают направления изменения ϵ . $T = 290$ K.

Плотность ρ , модуль Юнга E и условный предел микротекучести σ_s при величине неупругой деформации $\epsilon_d = 1.0 \cdot 10^{-8}$ для композитов, приготовленных на основе различных пород дерева ($T = 290$ K)

Материал	ρ , g/cm ³	E , GPa	σ_s , MPa
Био-SiC/Si (эвкалипт)	2.28	236	56
Био-SiC/Si (бук)	2.01	222	36
Био-SiC/Si (сапель)	2.04	193	21

В то же время следует отметить, что при самых больших амплитудах, использованных в эксперименте, реакция материала оказывается связанной не только с молекулами адсорбированных газов. Область высоких амплитуд, в которой наблюдаются увеличение затухания и уменьшение модуля с ростом амплитуды, характерна для многих материалов, обладающих пластичностью [7]. Такое поведение E и δ в исследуемых био-SiC/Si, ярче всего наблюдаемое, как правило, при повторных измерениях $E(\epsilon)$ и $\delta(\epsilon)$, особенно в вакууме, свидетельствует о том, что в них имеются элементы структуры, аналогичные подвижным дислокациям в кристаллах, которые обеспечивают заметную микропластическую деформацию под влиянием ультразвуковой нагрузки. Полученные в настоящей работе результаты акустических измерений позволили определить диаграмму напряжение σ — микропластическая деформация ϵ_d для SiC/Si из сапели, которая приводится на рис. 4 (кривая 3). На этом же рисунке для сравнения показаны аналогичные данные для SiC/Si из эвкалипта (кривая 1) и бука (кривая 2).

Сравнение механических (упругих и микропластических) характеристик всех материалов, исследованных к настоящему времени, проводится также в таблице. Из рис. 4 и таблицы видно, что наиболее высокими механическими характеристиками обладают композиционные образцы SiC/Si, приготовленные на основе эвкалипта. Аналогичные образцы из сапели имеют самые низкие значения модуля Юнга E и условного предела микротекучести σ_s .

Из сопоставления пористости различных биоуглеродных матриц (см. раздел 1) с величинами модуля Юнга и микротекучести композитов SiC/Si на их основе следует, что с ростом пористости значения E и σ_s уменьшаются (особенно σ_s). Кроме того, параметры упругости и пластичности могут быть связаны как с различной формой и геометрическими размерами ячеек и пор (которые могут быть открытыми или закрытыми), так и с разным составом химических элементов в исходной структуре того или иного дерева. При этом для всех исследованных био-SiC/Si адсорбция-десорбция молекул внешней среды также в значительной степени определяет действующие величины модуля Юнга и декремента акустических колебаний.

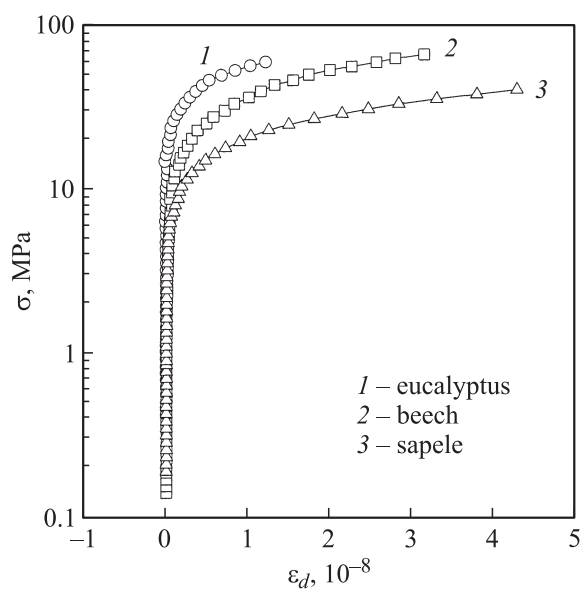


Рис. 4. Кривые напряжения — микропластическая деформация, полученные по данным акустических измерений на образцах различных биоморфных композитов SiC/Si при температуре 290 K.

Таким образом, в настоящей работе показано, что упругие и микропластические свойства композитов био-SiC/Si существенно зависят от типа дерева, на основе которого они приготовлены. Полученные результаты объясняются в первую очередь различиями в пористости исходного дерева, а также присутствием пор различных размеров и других дефектов структуры, которые в той или иной степени могут влиять на механические свойства исследованных материалов.

Список литературы

- [1] Б.И. Смирнов, Ю.А. Буренков, Б.К. Кардашев, F.M. Varela-Feria, J. Martinez-Fernandez, A.R. de Arellano-Lopez. ФТТ **45**, 3, 456 (2003).
- [2] Б.К. Кардашев, Ю.А. Буренков, Б.И. Смирнов, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, F.M. Varela-Feria. ФТТ **46**, 10, 1811 (2004).
- [3] Б.К. Кардашев, А.С. Нефагин, Б.И. Смирнов, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, R. Sepulveda. ФТТ **48**, 9, 1617 (2006).
- [4] B.K. Kardashev, B.I. Smirnov, A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, F.M. Varela-Feria. Eng. Mater. Sci. A **422**, 444 (2006).
- [5] A.R. de Arellano-Lopez, J. Martinez-Fernandez, P. Gonzalez, C. Domingez, V. Fernandez-Quero, M. Singh. Int. J. Appl. Ceram. Technol. **1**, 1, 95 (2004).
- [6] F.M. Varela-Feria. Ph. D. thesis. Universidad de Sevilla (2004).
- [7] С.П. Никаноров, Б.К. Кардашев. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. Наука, М. (1985). 254 с.
- [8] V.M. Chernov, B.K. Kardashev, L.M. Krjukova, O.A. Plaksin, A.E. Risanov, M.I. Solonin, V.A. Stepanov, S.N. Votinov, L.P. Zaviatsky. J. Nucl. Mater. **257**, 263 (1998).
- [9] Б.И. Смирнов, Ю.А. Буренков, Б.К. Кардашев, D. Singh, K.C. Goretta, A.R. de Arellano-Lopez. ФТТ **43**, 11, 2010 (2001).