

05

## **Внутреннее трение в волокнистом композиционном материале алюминий–оксид алюминия при пониженных температурах**

© А.Н. Качевский

Новороссийская государственная морская академия

Поступило в Редакцию 19 июля 2001 г.

При исследовании температурной зависимости внутреннего трения композиционного материала при изгибных колебаниях выявлены острые нестабильные максимумы затухания механических колебаний, по-видимому, нерелаксационной природы.

Решение фундаментальной научной проблемы о механизмах релаксационных явлений в материалах с некогерентными межфазными границами является важным как для теории и практики самого метода внутреннего трения (ВТ), так и для исследования реальной структуры гетерофазных материалов различного назначения — конструкционных (композиционные материалы), материалов электронной техники (структуры типа "металл–диэлектрик–полупроводник") и т.д. [1–4]. Согласно обобщенной классификации [5], волокнистый композиционный материал (ВКМ) алюминий, упрочненный непрерывными волокнами оксида алюминия, имеет оксидный тип связи между компонентами, анализ которого с позиции метода ВТ с выходом на исследование структурной нестабильности материала и является задачей настоящей работы.

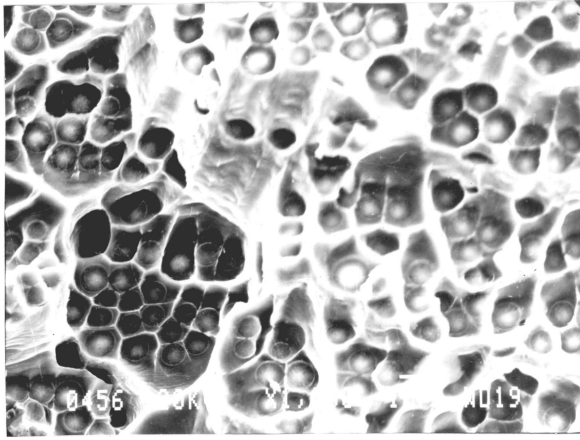
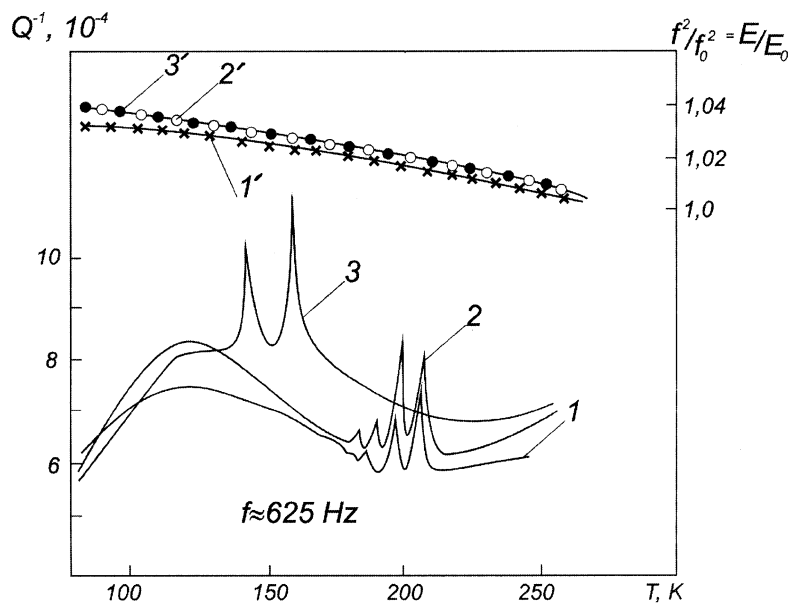


Рис. 1. Фрактограмма поверхности излома ВКМ  $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ .

ВКМ  $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , полученный методом вакуумно-компрессионной пропитки, практически не имел усадочных пор, горячих трещин и непропитанных участков между волокнами (рис. 1). Объемное содержание волокон оксида алюминия в ВКМ составляло 45%, средний диаметр волокон —  $14 \mu\text{m}$ , ВТ в ВКМ  $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$  измеряли на установках по методу "механической связи" и "обращенном" крутильном маятнике [1,2] при нагреве от температуры жидкого азота в амплитудно-независимой области спектра. Относительное изменение продольного динамического модуля упругости  $E/E_0$  считалось равным относительному изменению квадрата собственной частоты колебаний образца  $f^2/f_0^2$  ( $f_0$  — собственная частота колебаний при комнатной температуре).

На рис. 2 представлены некоторые результаты исследований температурных зависимостей ВТ и  $E/E_0$ , полученные методом "механической связи" при изгибных колебаниях. Пик ВТ при 120 К был нами ранее идентифицирован как релаксация Бордони в пластически деформированной под действием термических напряжений матрице ВКМ. Оказалось, что независимо от типа связи по межфазным границам композитов (были исследованы ВКМ:  $\text{Al}-\text{B}$ ,  $\text{Al}-\text{C}$ ,  $\text{Al}-\text{SiC}$ ,  $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , КМ  $\text{Al}$  — нитевидные кристаллы  $\text{SiC}$  и  $\text{CaCl}$ , т.е. включающие практически все типы связи по А. Меткалф), дислокационная релаксация Бордони явля-



**Рис. 2.** Температурные зависимости ВТ (1, 2, 3) и относительного изменения динамического модуля упругости ( $1'$ ,  $2'$ ,  $3'$ ) ВКМ Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при термоциклировании. Кривые 1, 2, 3 и  $1'$ ,  $2'$ ,  $3'$  получены при нагреве от температуры жидкого азота соответственно на первом, втором и третьем термоциклах.

ется неотъемлемым свойством всех КМ на основе алюминиевых сплавов при пониженных температурах [4,6–9]. Отмечена определяющая роль влияния термических напряжений на особенности формирования и поведения пика Бордони в КМ.

Помимо пика Бордони в ВКМ Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на кривых температурной зависимости ВТ при изгибных колебаниях выявляются острые и нестабильные максимумы затухания механических колебаний, по-видимому, нерелаксационной природы (рис. 2). Температурное положение их и высота зависят от числа термоциклов, термической предыстории образцов и мало зависят от амплитуды колебательной деформации, т.е. имеют некоторые общие черты с пиком ВТ нерелаксационной природы в КМ Al–нитевидные кристаллы SiC при крутильных коле-

баниях [9]. И в то же время, вид динамической нагрузки и частота колебаний отличаются. При крутильных колебаниях в ВКМ Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> этот эффект не обнаружен, хотя релаксация Бордони имеет место при 90 К.

Приведенные выше экспериментальные особенности поведения нерелаксационных пиков ВТ в ВКМ Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и некоторые другие данные позволили сделать предположение о связи этих пиков с микротрещинами по межфазным границам раздела, а механизм затухания — типа резонансных потерь. Такого рода динамическое поведение трещин в ВКМ теоретически предсказано в работе [10], где показано, что в зависимости от геометрии трещин, их взаимного расположения в ВКМ на кривых спектральной зависимости амплитуды колебаний может наблюдаться несколько резонансов. Видимо, в нашем случае взаимодействие упругих полей напряжений концентраторов (армирующая фаза) с упругими полями скопления дислокаций матрицы в вершине трещины в приложенном внешнем поле переменных напряжений приводит к элементарным актам раскрытия–закрытия микротрещин и рассеянию энергии колебаний резонансным путем.

Роль термических напряжений в матрице сводится к обеспечению условий для появления резонанса — они должны быть минимальными и сравнимыми по величине с напряжениями в ВКМ, возбуждаемыми в процессе измерения ВТ.

Смещение температуры появления пиков при термоциклировании подтверждает эту роль термических напряжений. Распределение микротрещин по размерам и форме, их различная подвижность приводит к возникновению нескольких максимумов резонансного типа.

Представляет интерес оценка размеров микротрещин по межфазным границам в ВКМ Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Следуя А. Келли [11] и используя его же данные по сопротивлению распространению трещины  $G_c = 40 \text{ J/m}^2$  и  $K_c = 14 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ , а также значение предела прочности поверхности раздела Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\sigma = 9.1 \text{ kgf/mm}^2$  и  $E_{\text{ВКМ}} = 93 \text{ GPa}$ , получим  $l = 0.15\text{--}0.8 \text{ mm}$ .

Как уже отмечалось, только в ВКМ с "оксидным типом связи" компонентов наблюдается резонансный пик ВТ, тогда как для других КМ и в том числе со "смешанным типом связи" (например, в ВКМ Al–В, где наряду с "оксидной" связью компонентов реализуется и "реакционная" связь) такого рода неупругие эффекты не обнаруживаются. Следовательно, "оксидная" связь компонентов ВКМ поддается анализу методом ВТ,

а это, что наиболее важно, позволит исследовать некоторые особенности механизма образования связи. Но для этого необходимы дополнительные исследования, в первую очередь, по уточнению физической природы пиков ВТ, их связи с адгезионными характеристиками материала, что уже является задачей дальнейших исследований.

## Список литературы

- [1] *Постников В.С.* Внутреннее трение в металлах. М.: Металлургия, 1974. 352 с.
- [2] *Блантер М.С., Пигузов Ю.В., Ашмарин Г.М.* Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях. М.: Металлургия, 1991. 248 с.
- [3] *Левин В.П., Проскурин В.Б.* Дислокационная неупругость в металлах. М.: Наука, 1993. 272 с.
- [4] *Качевский А.Н.* Диссипация упругой энергии в композиционных материалах на основе алюминиевых сплавов с некогерентными межфазными границами. Автореферат дис. д-ра техн. наук. М.: ИМЕТ РАН, 1992. 32 с.
- [5] *Поверхности раздела в металлических композитах / Под ред. А. Меткалф.* Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 437 с.
- [6] *Качевский А.Н.* // ДАН. 1992. Т. 323. № 1. С. 78–81.
- [7] *Постников В.С., Аммер С.А., Качевский А.Н.* // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 9. С. 560–563.
- [8] *Kachevsky A.N., Shorshorov M.Kh.* // J. Mater. Characterization. 1991. N 3. P. 177–191.
- [9] *Качевский А.Н., Шоршоров М.Х., Алехин В.П.* // ДАН. 1990. Т. 315. № 6. С. 1377–1381.
- [10] *Awal M.A., Kundu T., Joshi S.P.* // Eng/Fracture Mechanics. 1989. V. 33. N 5. P. 753–764.
- [11] *Келли А.* Высокопрочные материалы / Пер. с англ. М.: Мир, 1978. 261 с.