

05.1;12

©1995

МНОЖЕСТВЕННОЕ ДРОБЛЕНИЕ ВОЛОКОН В КОМПОЗИТЕ AL-B ПО МЕХАНИЗМУ РЕЛАКСАЦИОННОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

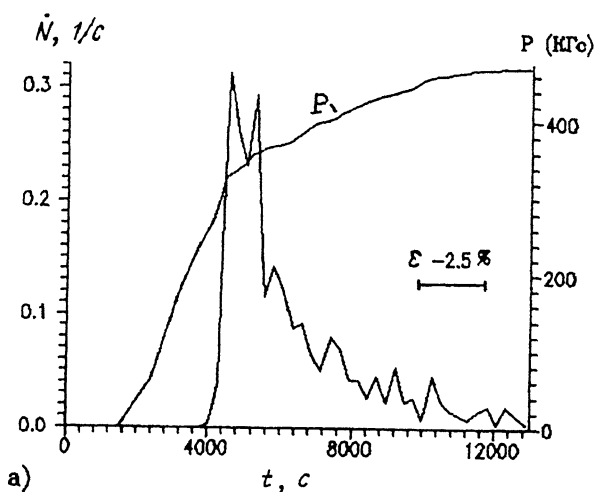
А.П.Тишкин, А.Абдуманонов, А.М.Лексовский

Широко используемые модели разрушения волокнистых композиционных материалов основываются на том, что макроразрушение происходит в результате разрыва в одном сечении материала определенного числа соседних волокон [1]. Вероятность данного события увеличивается вследствие роста локальных напряжений около возникшего разрыва. Считается, что в имеющихся моделях перераспределение локальных напряжений происходит со скоростью распространения упругих волн, т. е. за время максимум в несколько микросекунд. Соответственно считается, что если в этом интервале времени разрыва соседнего волокна не происходит, то в дальнейшем он возможен лишь за счет увеличения внешнего напряжения или деформации при ползучести.

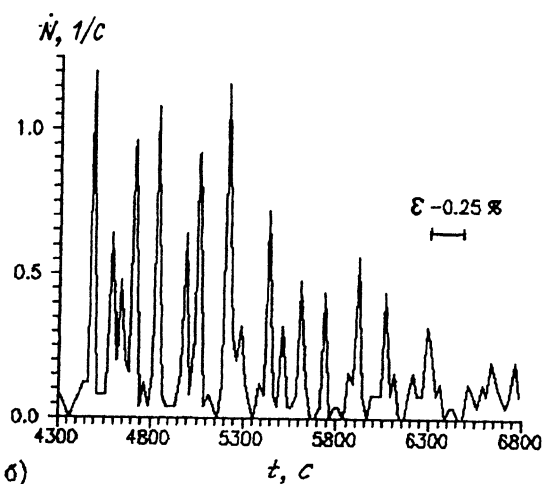
Ранее на модельных образцах с несколькими волокнами в эпоксидной матрице [2] и на образцах из реальных углепластиков [3,4] нами было показано, что разрыв соседних волокон может происходить в ходе релаксационного перераспределения локальных напряжений. В этом случае интервал времени между соседними разрывами оказывается в пределах от десятков микросекунд до сотен миллисекунд. Эти значения много больше, чем при упругом перераспределении напряжения, но достаточно малы, чтобы пренебречь в данных экспериментах увеличением внешнего напряжения. Среди распространенных композитов одним из наиболее чувствительных к соседним разрывам волокон является алюминий, упрочненный высокомолекулярными борными волокнами большого диаметра. Поэтому можно было ожидать, что в бороалюминии релаксационное перераспределение напряжения существенным образом сказывается на макроразрушении. С другой стороны, в используемом на практике бороалюминии с высоким объемным содержанием волокон V_f для разрушения при комнатной температуре достаточно всего двух-трех соседних разрывов волокон [3]. В этой связи для набора достаточной статистики по коррелированному разрыву волокон был выбран бороалюминий с малым V_f , при котором основную нагрузку несет матрица.

В испытаниях на растяжение исследовались образцы бо-роалюминия, полученные методом диффузионной сварки под давлением, с размером рабочей части $2.1 \times 4.3 \times 22$ мм и объемным содержанием волокон (диаметром 100 мкм) 2.5%. Волокна расположены в 4 слоя в матрице алюминиевого сплава Д16Т. В поперечном сечении образца находится примерно 30 волокон. Нагружение проводилось со скоростями 0.017, 0.118 и 0.525 мм/мин. Разрывы волокон регистрировались методом акустической эмиссии (АЭ). Сигналы АЭ от разрывов волокон хорошо отделяются по амплитуде от сигналов других источников, поэтому в дальнейшем мы везде подразумеваем, что такая селекция проведена и вся анализируемая АЭ обусловлена разрывами волокон.

На рисунке *a* представлены диаграмма нагружения и активность АЭ \dot{N} (число сигналов в единицу времени) за все время нагружения образца при скорости 0.017 мм/мин. В области 4000–6000 с, как показывает металлографический анализ, происходит массовое дробление волокон, после прохождения которого основную нагрузку несет матрица. Общее число разрывов волокон в образцах лежит в интервале 600–800. Исходя из этого критическая длина волокна l_c может быть равной примерно 1 мм. Независимо от использованных скоростей нагружения область массового дробления волокон занимает по деформации примерно 2.5%. На рисунке *b* $\dot{N}(t)$ в области массового дробления представлена в растянутом масштабе времени. Как можно видеть, здесь обнаруживается наличие “тонкой структуры” пика активности, выраженной в том, что он распадается на 12–15 резких пиков. Число сигналов в этих пиках варьирует в пределах 25–100% от общего числа волокон в сечении. Данные по линейной локализации сигналов АЭ подтверждают локализацию разрывов в пределах пика \dot{N} в одном сечении 2–3 мм. Расстояние между пиками активности в пересчете на деформацию также не зависит от скорости нагружения и составляет 0.1–0.2%. Однако ширина самих пиков (см. рисунок, *в*) инвариантна уже не в деформационном масштабе, а в масштабе времени. Это означает, что процесс массового разрыва волокон в одном сечении можно рассматривать как происходящий при постоянной нагрузке и деформации, т. е. как коррелированный процесс. В то же время этот процесс не может определяться только упругим перераспределением напряжения, так как тогда он прошел бы за несколько микросекунд и был бы зарегистрирован как один сигнал очень большой амплитуды. В данных конкретных условиях измерения АЭ сигналы регистрировались бы как один сигнал, если временной интервал между ними был меньше 1 мс. Поскольку в нашем случае интервалы времен следования много больше, то следует принять, что характеристики коррели-

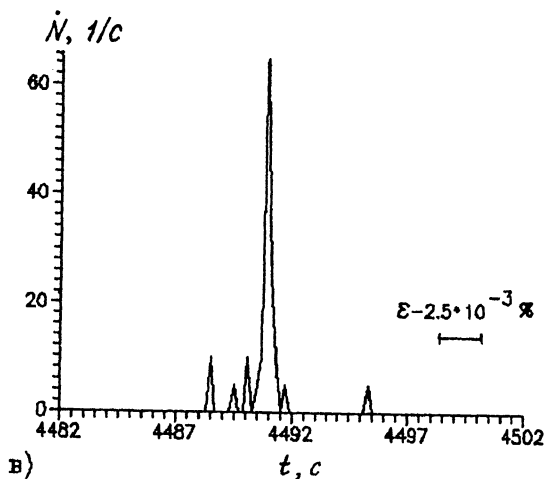


a)



b)

Активность АЭ \dot{N} в В-Аl (2.5%), связанная с дроблением борных волокон. Скорость нагружения 0.017 мм/мин: а — \dot{N} за все время нагружения, P — нагрузка на образец; б, в — \dot{N} в увеличенном масштабе по времени.



(продолжение).

лированных разрывов волокон в сечении образца определяются релаксационными свойствами матрицы. Подробнее характеристики процесса во времени будут рассмотрены в следующей работе. По модели, предложенной нами в [4], по экспоненциальному или близкому к нему закону релаксации увеличивается дистанция между концами разорванного волокна, что приводит к соответствующему увеличению размера пластической зоны около места разрыва и увеличению сдвиговой деформации внутри этой зоны.

Если в бороалюминии с объемным содержанием волокон 2.5% процесс коррелированных разрывов эстафетным образом охватывает все сечение образца, то можно ожидать, что при большем объемном содержании такой процесс, начавшись в одном из сечений, приведет к разрушению образца в этом сечении. Испытания таких образцов показали, что в них к разрушению действительно ведет последовательность разрывов волокон с интервалами времени между ними, характерными для релаксационного перераспределения напряжений. При комнатной температуре для $V_f = 18\%$ такая последовательность включает 3 разрыва волокон за 11 мс, а при $T = 300^\circ\text{C}$ и $V_f = 18$ и 43% — соответственно 20 разрывов за 8.2 с (3% от времени нагружения) и 11 разрывов за 6.4 с (1%).

Таким образом, в данной работе обнаружено влияние релаксационного перераспределения локальных напряжений в бороалюминии на дробление волокон и показано, что такое перераспределение приводит к лавинообразному разрыву волокон в сечении образца, т. е. к разрушению.

Список литературы

- [1] *Zweber C.H.* // AIAA J. 1968. N 12. P. 2325–2331.
- [2] *Лексовский А.М., Абдуманов А.* и др. // Механика композитных материалов. 1984. № 6. С. 1004–1010.
- [3] *Лексовский А.М., Губанова Г.Н.* и др. // Физика прочности гетерогенных материалов. Л., 1988. С. 69–77.
- [4] *Tishkin A.P., Gubanov G.N., Leksowski A.M., Yudin V.E.* // J. Mater. Sci. 1994. V. 29. N 3. P. 632–639.

Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
22 мая 1995 г.

