

УДК 539.4:620.179.16

## АКУСТОЭМИССИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ МЕЗОДЕФЕКТОВ И МАКРОРАЗРУШЕНИЕ ГЕТЕРОГЕНННОГО МАТЕРИАЛА С РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ

Лексовский А. М., Гаврилин А. В., Баскин Б. Л.

*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,  
albert.leksowski@mail.ioffe.ru*

Известно, что неизбежным следствием при деформировании твердых тел с микропластичностью и, тем более, гетерогенных тел с различием по упругопластическим свойствам компонентов, является накопление повреждений не только на уровне элементарных дефектов кристаллической решетки, но и на более высоком масштабном уровне – на уровне микро- и мезотрещин размером  $0,1-100$  мкм. Принято считать, что исчерпание ресурса долговечности, т.е. макроразрушение, есть следствие этих процессов. Физика трансформации скопления элементарных дефектов кристаллического строения типа дислокаций в микротрещину изучена достаточно подробно. А вопрос о преобразовании микротрещины в магистральную, на наш взгляд, требует обстоятельного исследования.

Результаты дифракционных, интегральных методов наблюдения в некоторых полимерных материалах множественного образования микротрещин, размер и число которых в течение жизни образца практически не изменяется (см., напр. [1]), в легли в основу "концентрационного критерия" (двухстадийной модели) разрушения (см., например, [2]). Полагается, что условием перехода от образования изолированных микротрещин к процессу их коррелированного зарождения и образованию магистральной трещины должна быть такая их объемная концентрация, когда при среднем расстоянии между ними, примерно равном трем средним размерам, в локальных областях возможно наложение упругих полей, что и должно обеспечить ускорение слияния. Однако подобное предположение до сих пор экспериментально никак не обосновано и является, как минимум, более чем спорным.

Опыты непосредственно в колонне растрового электронного микроскопа РЭМ [3,4] при изучении зарождения и развития микротрещин на уровне  $0,1 \pm 1$  мкм в предвершинной области искусственно созданного макроконцентратора в тонких ( $40 \pm 200$  мкм) образцах полимерных материалов и металлов, а также в модельных экспериментах при исследовании взаимодействия более масштабных ( $10^3 \pm 10^4$  мкм) трещин (см., напр., литературу в [3]) показали отсутствие ускоренного ("упругого") взаимодействия при их взаимном сближении и вошли в резкое противоречие с "концентрационным критерием". Эти экспериментальные результаты, на наш взгляд, не позволяют рассматривать группу из нескольких микротрещин непременно как очаг разрушения, как необходимое и достаточное условие для перехода на этап динамического макроразрушения.

Для выяснения механизма формирования магистральной трещины в телах с множественным образованием микротрещин необходимо получение прямых экспериментальных данных о развитии именно ансамбля микротрещин как в плане локального распределения, так и в плане статистических особенностей динамики этого процесса.

Представляется, что в общем случае более адекватным напряженным состоянием может быть условие плоской деформации, и при этом материалом исследования могут служить композитные системы с однонаправленным расположением армирующих во-

локон. С одной стороны, они являются современными конструкционными материалами. В то же самое время, они могут рассматриваться как хорошая модель с регулярной мезо организацией с известным представительным структурным элементом. К тому же выбор нагружения с постоянной скоростью деформирования с целью уменьшения влияния релаксационных (диссипативных) процессов делает режим эксперимента более жестким, например, по сравнению с испытанием при постоянном напряжении. Такая гетерогенная система гарантирует появление трещин в результате, преимущественно, первоочередного разрыва именно высокомодульных волокон с большой запасенной энергией упругой деформации. А роль матрицы (материала в межволоконном пространстве) сводится, преимущественно, к демпфированию последствий взрывообразно рождающихся микротрещин, что ранее уже было показано в опытах *in situ* [4], и при этом именно её релаксационные (а не только упругие) свойства, в основном, определяют и размер локальной микрокатастрофы (микротрещины) [6], и динамику перераспределения напряжений в окружающем локальном объеме [7].

В качестве материала исследования были использованы образцы углсаломинации размером рабочей части  $\approx (90 \times 1 \times 7)$  мм. Диаметр угольных волокон  $\approx 7$  мкм, общее количество волокон в образце превышало  $2 \cdot 10^3$ . Поверхность углеродных волокон предварительно защищалась путем осаждения из газовой фазы (TiC+Ni). Деформирование при комнатной температуре производилось на машине 1231У-10. Использовалась система линейной локации сигналов акустической эмиссии (АЭ). На образце крепились два пьезодатчика с резонансной частотой 300÷450 КГц. Регистрирующая аппаратура на базе процессора Э-60 и мини-ЭВМ НР-9835А [8]. Точность локации источников сигналов АЭ зависит от нескольких факторов, в том числе, от амплитуды импульса. В исследуемом случае определение линейных координат источников сигналов АЭ было с точностью на уровне  $2 \div 2,5$  мм.

На рис. 1 в качестве иллюстрации приведена 3D диаграмма при деформировании одиночного углеродного волокна диаметром около 7 мкм в матрице из эпоксидной смолы ЭД-20 горячего отверждения. Как можно видеть, разрывы волокна достаточно удовлетворительно можно приписать к вполне определенной области по координате длины образца и величине деформации этого модельного образца. Эти данные дают основание для обоснования детального развития событий в локальной области с разрешением не хуже 2 мм. Зафиксированными оказались 7 событий, последовательно появляющихся по мере деформирования. Следует отметить, что первый разрыв волокна ( $\epsilon \approx 0,63$  %) оказался, как и можно было ожидать, самым низкоэнергетическим. Последнее (7-е) событие не было элементарным, поскольку временное разрешение равно 1 мс, так что этот пик включает в себя несколько единичных разрывов.

Рассмотрим, как и в каком сечении происходили разрывы волокон при деформировании образца углсаломинации. Для этого удобнее и нагляднее представить серию последовательных временных "срезов", а не единую и компактную 3D диаграмму. На рис. 2 представлены промежуточные распределения числа АЭ-событий по длине образца с дискретностью 100÷150 сек по времени нагружения. Можно видеть, что процесс накопления микроразрушений начал проявляться на исходе первых 600 сек деформирования в зоне  $(-22) \div (-18)$  мм. После появления в этой зоне первых десятков сигналов начинают последовательно "подключаться" соседние области в направлении центра и противоположного края образца. До момента  $\sim 1100$  сек первая активная зона обгоняла в развитии процесса все другие области. Но со времени 1300 сек более интенсивно начинает "звучать" область  $10 \div 25$  мм. К моменту  $\sim 2000$  сек первая зона всё ещё имела большее число АЭ событий. С этого времени абсолютное лидерство начинает принадлежать зоне с координатами  $12 \div 25$  мм и центру образца. Итоговое распределение показывает наибольшую поврежденность в области  $12 \div 14$  мм. Однако итоговое макрораз-

рушение, как показало прямое измерение post factum, прошло по области с координатами  $18 \pm 23$  мм.

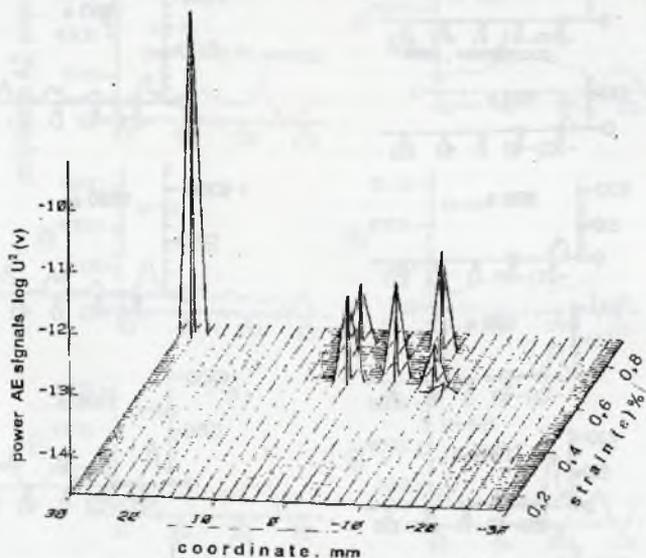


Рис. 1. 3D диаграмма регистрации АЭ сигналов при деформировании модельного образца: углеродное моноволокно в матрице из отвержденной эпоксидной смолы ЭД-20.

Обратимся к рассмотрению изменения амплитудного распределения по мере деформирования. В разных участках по длине образца в начальный период деформирования (до 1500 сек) средняя амплитуда АЭ, преимущественно, соответствует либо одиночному разрыву углеродного волокна, либо в некоторых местах могут наблюдаться и на порядок большие сигналы, что следует рассматривать как свидетельство развития процесса более однородной загрузки сечений за счет постепенной "выбраковки" локальных мезоструктурных неоднородностей. Никаких последствий от anomalously больших АЭ событий в ближайшем окружении на этом этапе деформирования не наблюдается.

Представляет интерес рассмотреть динамику АЭ энерговыделения в области  $10 \pm 27$  мм за последние 153 сек деформирования с дискретностью 5 сек (см. рис. 3), поскольку именно на финальной стадии можно ожидать проявления определенной иерархии в процессе накопления микроразрушений. Как можно видеть, средняя амплитуда сигналов в этой области, число которых ( $N$ ), как правило, от нескольких десятков до 150, меняется, в целом, незначительно – в пределах  $200 \pm 300$  мкв, что соответствует групповому разрыву  $2 \pm 3$  волокон одновременно (в пределах временного разрешения 1 мсек), строгой регулярности укладки которых достичь не удаётся. При этом наблюдается некое волнообразное движение фронта энерговыделения в пределах зоны шириной  $15 \pm 17$  мм с промежуточными всплесками, распадом кратковременной группировки, и даже "отражением" от границ области.

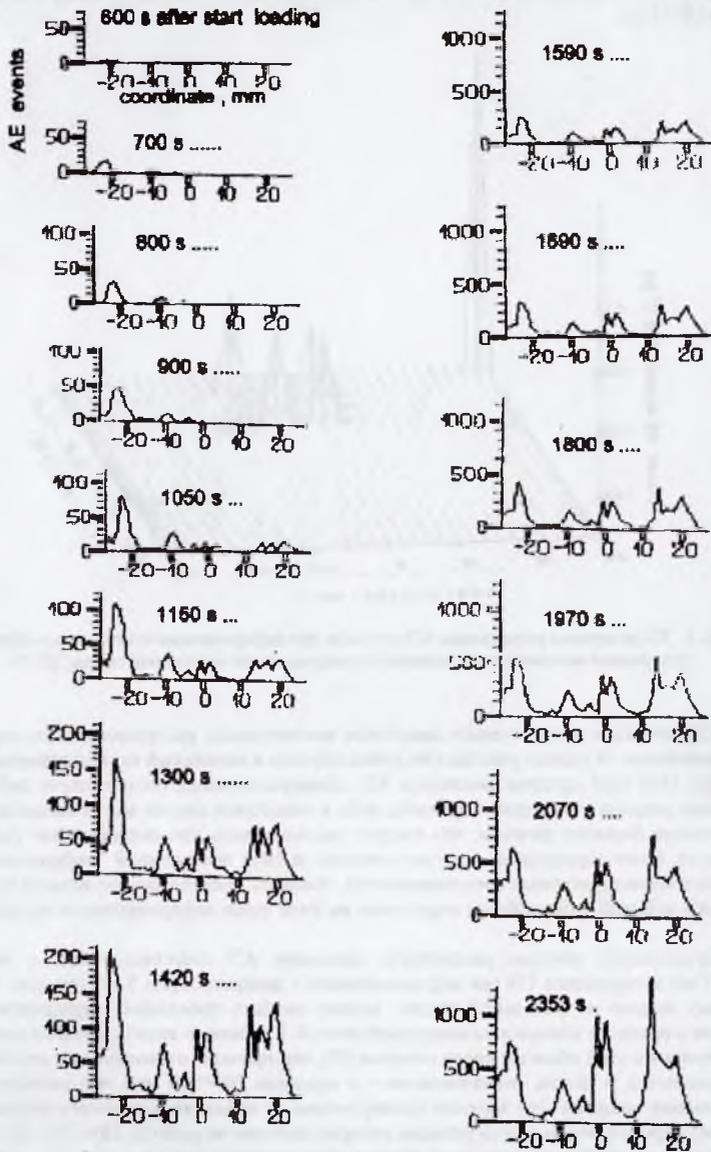


Рис. 2. Развитие процесса накопления разрывов волокон

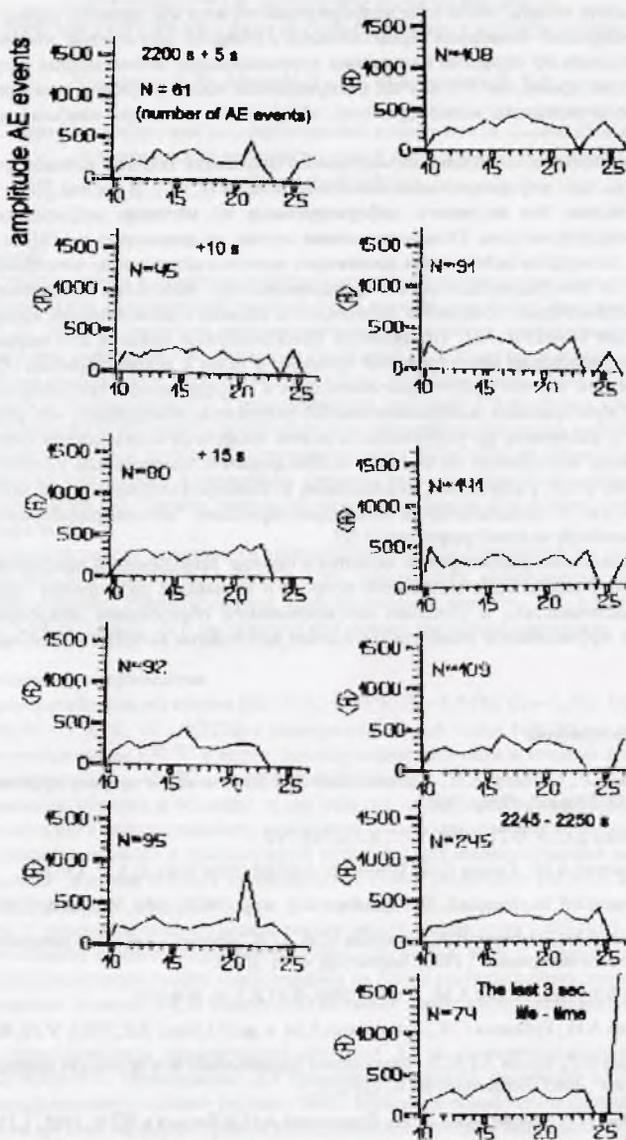


Рис. 3. Распределение амплитуд сигналов АЭ по длине образца за последние 153 сек из общего времени деформирования 2253 сек с шагом по 5 сек с указанием числа учтенных АЭ-событий в этом конкретном временном отрезке процесса деформирования.

Можно видеть, что в зоне макроразрыва образца как единого целого (18÷23 мм) не зафиксировано появления серии сигналов с большой амплитудой, что могло бы свидетельствовать об иерархии нарастания коррелированно возникающих разрывов волокон. В тоже время, как и в случае распределения числа разрывов, усматривается тенденция определенного волнообразного, эстафетного смещения наиболее активной зоны.

Аналогичное смещение зон активного дробления борных волокон ранее [9] наблюдалось при деформировании композиции Al-B (2,5%). В работе [10] волнообразное смещение зон активного деформирования на металлах наблюдалось методом спекл-интерферометрии. Отличие в нашем случае, по сравнению с [10], заключается в том, что движущим источником достоверно является образование мезотрещин и последующее за ним релаксационное перераспределение локальных напряжений [9]. При этом дополнительным появляется возможность анализа статистических аспектов потока источников сигналов АЭ, что является принципиально важным для выяснения механизма формирования магистральной трещины в телах с множественным образованием микротрещин, но что требует дополнительного и специального рассмотрения.

Итак, приведенные экспериментальные результаты показывают, что для гетерогенных тел с различием по упругопластическим свойствам компонентов множественное образование мезотрещин не является необходимым и достаточным условием для формирования очага разрушения, образования и катастрофического роста магистральной трещины как то предполагается при формулировании "концентрационного критерия" (двухстадийной модели) разрушения [2].

Проведенное рассмотрение является в первом приближении необходимым шагом в решении более общего и главного вопроса о механизме разрушения твердых тел с микропластичностью, в условиях множественного образования микротрещин – как наиболее эффективного элемента механизма диссипации высоких локальных напряжений.

#### Список литературы

1. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томащевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. - М, "Наука", 1974, - 560.
2. Куксенко В.С. // ФТТ, 2005, Т.47, В.5, С.788-792
3. Лексовский А.М., Сакиев С.Н., Шмидт В. // ФММ, 1976, Т.41, В.3, С. 637-643
4. Лексовский А.М., Баскин Б.Л., Горенберг А.А. и др. //ФТТ, 1983, Т.25, В.4, С.1096-1103
5. Алешин В.И., Дологова Н.А., Бессонов М.И. // Сб. "Физика и механика разрушения композиционных материалов", 1986, Ленинград, ФТИ, 20-29.
6. Юдин В.Е., Лексовский А.М., // ФТТ, 2005, Т.47, В.5, С. 944-950
7. Тишкин А.П., Губанова Г.Н., Лексовский А.М. и др. // J.Mater Sci., 1994, V.29, P.632-639
8. Ржевкин В.Р., Орлов Л.Г.//Сб. "Механизмы повреждаемости и прочность гетерогенных материалов", 1985, Ленинград, ФТИ, 209-211
9. Тишкин А.П., Абдуманов А. А., Лексовский А.М // Письма в ЖТФ, 1995, Т.21, В.15, С.10-14
10. Баранникова С.А., Данилов В.И., Зуев Л.Б.// ЖТФ, 2004, Т.74, В.10, С.52-56