

05;08

Эволюция ансамбля мезодефектов при деформировании гетерогенного материала с регулярной структурой

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

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

E-mail: albert.leksowskij@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 27 августа 2007 г.

С применением методов локации и амплитудно-временного анализа сигналов акустической эмиссии показано, что при деформировании гетерогенного материала с регулярной структурой будущая область макроразрыва никак жестко не связана с накопленными на предыдущих этапах мезотрещинами и в ней отсутствует иерархия нарастания коррелированно возникающих мезотрещин; она формируется достаточно „случайным“ образом в результате попеременного активного образования мезотрещин в разных локальных областях вследствие прогрессирующего под действием нагрузки сокращения диссипативной способности окружающего объема.

PACS: 61.72.Cc, 62.20.Mk

Известно, что неизбежным следствием при деформировании твердых тел с микропластичностью и тем более гетерогенных тел с ярко выраженным 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 нарушений сплошности, (микро-) мезотрещин размером $0.1 \div 100 \mu\text{m}$. 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.

Опыты непосредственно в колонне растрового электронного микроскопа РЭМ [1,2] при изучении зарождения и развития микротрещин на уровне $0.1 \div 1 \mu\text{m}$ в предвершинной области искусственно созданного

макроконцентратора в тонких ($40 \div 200 \mu\text{m}$) образцах полимерных материалов и металлов, а также в модельных экспериментах при исследовании взаимодействия более масштабных ($10^3 \div 10^4 \mu\text{m}$) трещин (см., например, обзор в [3]) показали отсутствие ускоренного („упругого“) взаимодействия при их взаимном сближении. 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 волокон. С одной стороны, они являются современными конструкционными материалами. В то же самое время они могут рассматриваться как хорошая модель с регулярной мезоструктурной 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 мезотрещин в результате преимущественно первоочередного разрыва именно высокомодульных волокон с большой удельной 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* [2], и при этом именно ее релаксационные (а не только упругие) свойства в основном определяют и размер локальной микрокатастрофы (микротрещины) [4] и динамику перераспределения напряжений в окружающем локальном объеме [5].

В качестве материала исследования были использованы образцы углеалюминия размером рабочей части $\approx (90 \times 1 \times 7) \text{ mm}$. Диаметр угольных волокон $\approx 7 \mu\text{m}$, общее количество волокон в образце превышало $2 \cdot 10^3$. Поверхность углеродных волокон предварительно защи-

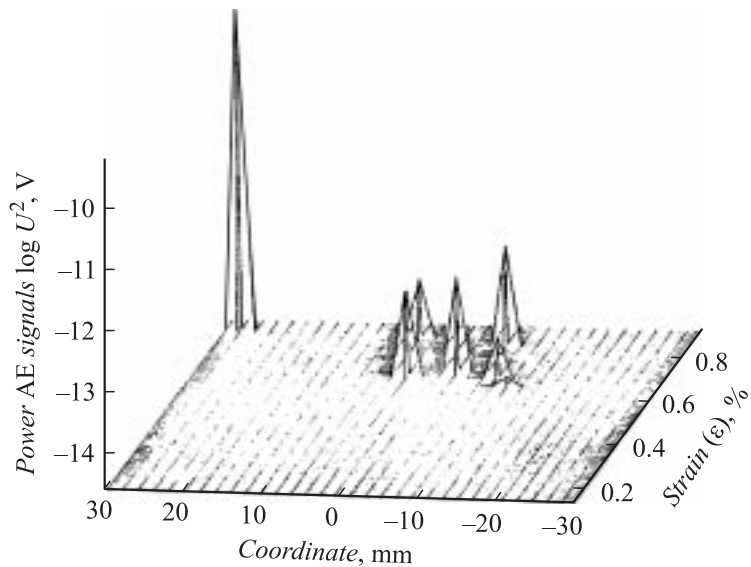


Рис. 1. 3D-диаграмма регистрации АЭ сигналов при деформировании модельного образца углеродное моноволокно в матрице из отвержденной эпоксидной смолы ЭД-20.

щалась 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 $300 \div 450$ kHz. Регистрирующая аппаратура на базе процессоров Э-60 и НР-9835А [6]. Точность локации источников сигналов АЭ зависит от нескольких факторов, в том числе от амплитуды импульса. В исследуемом случае точность определения линейных координат источников сигналов АЭ была на уровне $2 \div 2.5$ mm.

На рис. 1 в качестве иллюстрации приведена 3D-диаграмма при деформировании одиночного углеродного волокна диаметром около $7 \mu\text{m}$ 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 обсуждения детального развития событий в локальной области с разрешением не хуже 2 mm. 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 ms, так что этот пик включает в себя несколько единичных разрывов.

Рассмотрим, как и в каком сечении по длине происходили разрывы волокон при деформировании образца углеалюминия. 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 $100 \div 150$ s по времени нагружения. Можно видеть, что процесс накопления микроразрушений начал проявляться на исходе первых 600 s деформирования в зоне с координатами $(-22) \div (-18)$ mm. После появления в этой зоне первых десятков сигналов начинают последовательно „подключаться“ соседние области в направлении центра и противоположного края образца. До момента ~ 1100 s первая активная зона обгоняла в развитии процесса все другие области. Но со времени 1300 s более интенсивно начинает „звучать“ область с координатами $10 \div 25$ mm. К моменту ~ 2000 s первая зона все еще имела большее число АЭ-событий. С этого времени абсолютное лидерство начинает принадлежать зоне с координатами $12 \div 25$ mm и центру образца. Итоговое распределение показывает наибольшую поврежденность в области $12 \div 14$ mm. Однако макроразрушение, как показало прямое измерение *post factum*, прошло по области с координатами $18 \div 23$ mm.

Обратимся к рассмотрению изменения амплитудного распределения по мере деформирования. В разных участках по длине образца в начальный период деформирования (до 1500 s) 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 аномально больших АЭ-событий в ближайшем окружении на этом этапе деформирования не наблюдается.

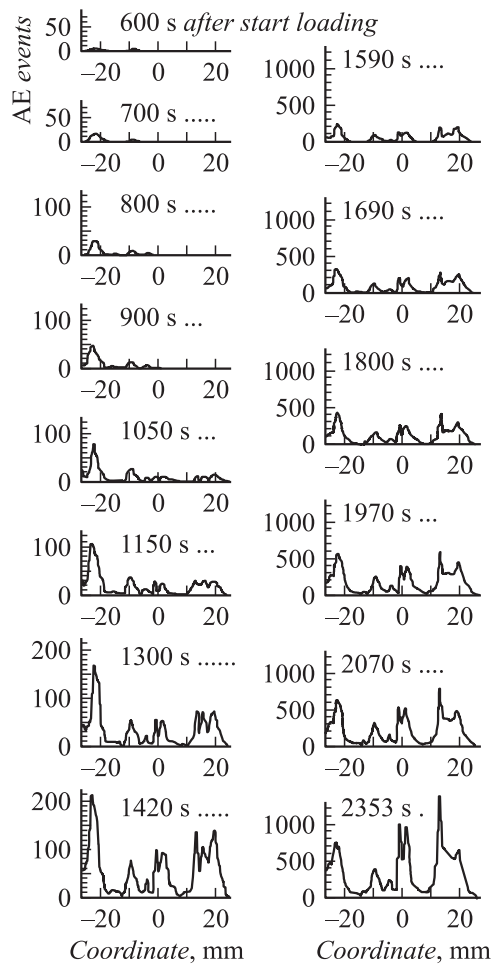


Рис. 2. Развитие процесса накопления разрывов углеродных волокон.

Представляет интерес рассмотреть динамику АЭ-энерговыделения в области $10 \div 27$ mm за последние 153 s деформирования с дискретностью 5 s (рис. 3), поскольку именно на финальной стадии можно ожидать проявления определенной иерархии в процессе накопления микроразрушений. Как можно видеть, средняя амплитуда сигналов в

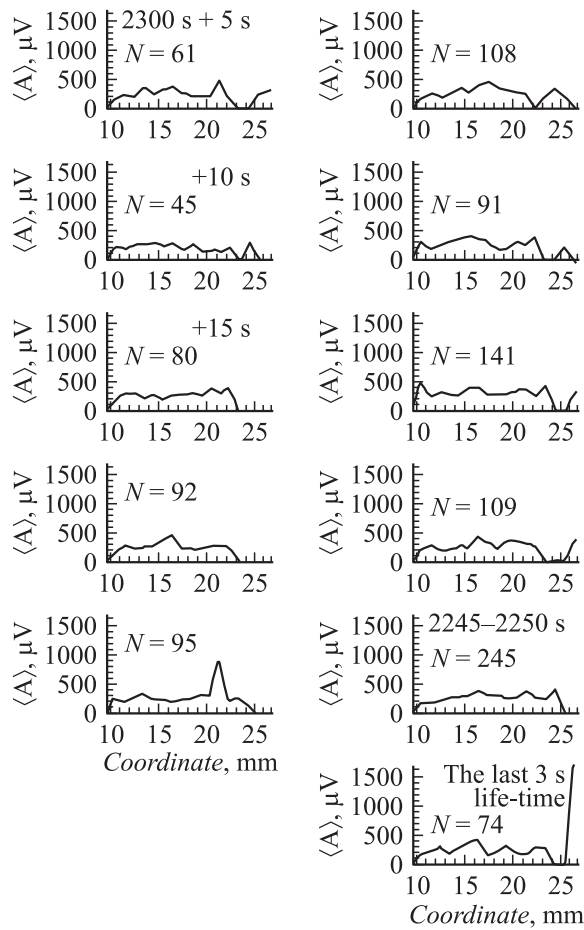


Рис. 3. Распределение средних амплитуд $\langle A \rangle$ сигналов АЭ по длине образца за последние 53 s из общего времени деформирования 2353 s с шагом по 5 s с указанием числа N зарегистрированных АЭ-событий в этом конкретном временном отрезке процесса деформирования.

этой области, число которых N , как правило, от нескольких десятков до 150, меняется в целом незначительно в пределах $200 \div 300$ mW, что соответствует групповому разрыву $2 \div 3$ волокон одновременно

(в пределах временного разрешения 1 ms), строгой регулярности укладки которых достичь не удастся. При этом наблюдается некое волнообразное движение фронта энерговыделения в пределах зоны шириной $15 \div 17$ mm с промежуточными всплесками, распадом кратковременной группировки и даже „отражением“ от границ области.

В итоге, как можно видеть, в месте старта будущей динамической трещины, т.е. в зоне макроразрыва образца как единого целого ($18 \div 23$ mm) не фиксируется какого-либо значительного итогового суммарного трещинообразования, нет и появления серии сигналов с большой амплитудой, что могло бы свидетельствовать об иерархии нарастания коррелированно возникающих разрывов волокон. В то же 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 [7] наблюдалось при деформировании композиции А1–В (2.5%). В работе [8] волнообразное смещение зон активного деформирования на поверхности металлов наблюдалось методом спеклинтерферометрии. Отличие в нашем случае по сравнению с [8] заключается в том, что движущим источником однозначно является образование мезотрещин и последующее за ним релаксационное перераспределение локальных напряжений [5]. При этом дополнительно 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 требует специального дополнительного рассмотрения.

Итак, приведенные экспериментальные результаты показывают, что для гетерогенных тел с ярко выраженным 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 [9].

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

Список литературы

- [1] *Лексовский А.М., Сакиев С.Н., Шмидт В.* // ФММ. 1976. Т. 41. В. 3. С. 637–643.
- [2] *Лексовский А.М., Баскин Б.Л., Горенберг А.Я.* и др. // ФТТ. 1983. Т. 25. В. 4. С. 1096–1103.
- [3] *Алешин В.И., Долотова Н.А., Бессонов М.И.* // Физика и механика разрушения композиционных материалов / Под ред. А.М. Лексовского. Л.: ФТИ, 1986. С. 20–29.
- [4] *Юдин В.Е., Лексовский А.М.* // ФТТ. 2005. Т. 47. В. 5. С. 944–950.
- [5] *Tishkin A.P., Gubanov G.N., Leksovskii A.M. and Yudin V.E.* // J. Mater Sci. 1994. V. 29. P. 632–639.
- [6] *Ржевкин В.Р., Орлов Л.Г.* // Механизмы повреждаемости и прочность гетерогенных материалов / Под ред. А.М. Лексовского. Л.: ФТИ, 1985. С. 209–211.
- [7] *Тишкин А.П., Абдуманонов А.А., Лексовский А.М.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 15. С. 10–14.
- [8] *Баранникова С.А., Данилов В.И., Зуев Л.Б.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 10. С. 52–56.
- [9] *Куксенко В.С.* // ФТТ. 2005. Т. 47. В. 5. С. 788–792.