

05.1; 07

© 1993

## ФРАКТАЛЬНАЯ РАЗМЕРНОСТЬ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НАГРУЖАЮЩЕГО ИМПУЛЬСА

М.В. Ерофеев, А.А. Калинин,  
В.А. Моисеев

Известно, что многие стандартные фрактальные характеристики поверхностей разрушения металлов (шероховатость, средний диаметр зерна, количество зерен на единицу площади) зависят от кратности увеличения оптической аппаратуры [1, 2]. Это явление получило название „масштабного эффекта“. Он проявляется вплоть до 20 000-кратных увеличений и, таким образом, существен и для оптической, и для электронной микроскопии.

В работе [3] установлено, что длина извилистой линии  $L$ , выраженная в некоторых единицах измерения  $\eta$ , зависит от этой единицы как

$$L(\eta) = L_0 e^{-(D-1)\eta}, \quad (1)$$

где  $D$  – фрактальная размерность линии, не зависит от  $\eta$ . Таким образом,  $D$  может рассматриваться как количественная характеристика поверхности разрушения, не подверженная влиянию масштабного эффекта.

В данной работе исследуются фрактальные размерности поверхностей откольного разрушения монокристаллического алюминия, полученные при воздействии на него лазерного излучения наносекундной длительности. Методика и параметры экспериментов описаны в [4, 5]. Использовались две длительности нагружающего импульса – 3 и 23 нс. Вследствие уширения волны сжатия в процессе ее распространения по материалу оценочные длительности импульсов в плоскости откола составили  $t_s = 25$  и 43 нс соответственно [4].

Фрактальные размерности определялись по методу вертикальных сечений (МВС) [2]. Согласно МВС, разрушенный образец разрезается так, чтобы плоскость сечения была перпендикулярна плоскости разрушения. Фрактальная размерность полученного таким способом профиля определяется путем линеаризации (1):

$$\ln(R_L(\eta)) = \ln(R_0) - (D-1)\ln(\eta), \quad (2)$$

где, согласно [2],  $R_L(\eta) = L(\eta)/L_*$ ,  $L_*$  – длина проекции профиля на плоскость разрушения. В нашей работе единица измерения  $\eta$

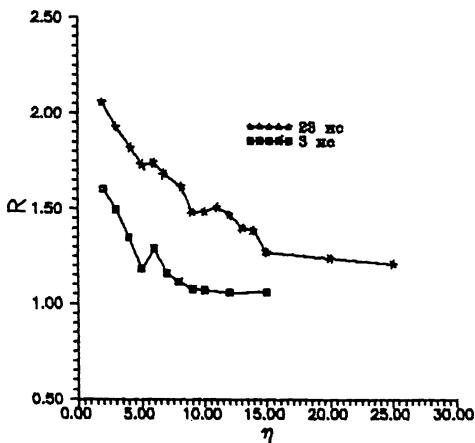


Рис. 1. Зависимость  $R = R(\eta)$  для монокристаллического алюминия.

бралась как кратная некоторой величине  $\eta_0$ :  $\eta = k\eta_0$ . В зависимости от масштаба увеличения оптической аппаратуры  $\eta_0 = 3-7$  мкм. Установлено, что для  $t_s = 25$  нс  $D = 1.23$  и для  $t_s = 43$  нс  $D = 1.20$ .

На рис. 1 приведены нелинеаризованные зависимости  $R = R(\eta)$ . Обращает на себя внимание тот факт, что при  $t_s = 25$  нс кривая содержит один, а  $t_s = 43$  нс – два локальных минимума. Из самой сути МВС следует, что подобные минимумы должны появляться при определении фрактальной размерности периодической кривой, при совпадении масштаба измерений  $\eta$  с периодом колебаний. Положение первого минимума кривой  $t_s = 43$  нс совпадает с минимумом кривой  $t_s = 25$  нс и соответствует  $\eta_{m1} \approx 8\eta_0$ . Вторым минимумом кривой  $t_s = 43$  нс наблюдается при  $\eta_{m2} \approx 16\eta_0 = 2\eta_{m1}$ . Отсюда очевидно, что в случае откольного разрушения Al на поверхности разрушения присутствуют периодические колебания микрорельефа, период которых равен  $8\eta_0 = 25-50$  мкм. Учитывая вязкий характер откольного разрушения алюминия, можно предположить, что период колебаний равен диаметру откольных микропор.

Статистическая обработка полученных результатов показала, что зависимость (2) с высокой точностью аппроксимируется прямой – коэффициенты корреляции везде выше 0.99. Таким образом, можно заключить, что откольные поверхности обладают свойствами самоподобия, то есть принадлежат к фрактальным объектам. Вместе с тем, как и в работе [2], установлено, что кривая (2) имеет слабовыраженную Z-образную форму, которая линеаризуется по методу [2]:

$$\ln \ln \left[ \frac{(R_L)_0 - 1}{R_L(\eta) - 1} \right] = \ln C + (D_f - 1) \ln(\eta), \quad (3)$$

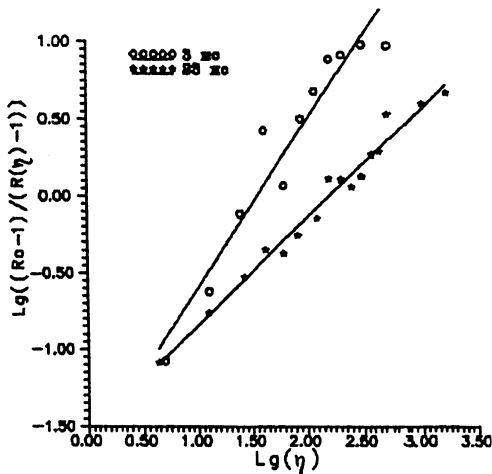


Рис. 2. Линеаризация зависимости  $R=R(\eta)$  с помощью (3) [2].

где  $(R_L)_0$  — длина профиля при  $\eta \rightarrow 0$ . В наших расчетах мы положили  $(R_L)_0 = R_0$ ,  $R_0$  определяется из (2). Для  $t_s = 25$  нс  $D_f = 2.09$ , для  $t_s = 43$  нс  $D_f = 1.70$ . Зависимость (3) показана на рис. 2.

В [2] эти же характеристики приводятся для легированной стали AISI 4340, разрушаемой при квазистатическом нагружении. В зависимости от термообработки  $D = 1.07-1.09$ ,  $D_f = 1.44-1.56$ . В работе [6] методом островов среза определены фрактальные размерности поверхностей разрушения хрупких керамик, которые оказались равными 1.15–1.34. Таким образом, мы видим, что в нашем случае величины фрактальных размерностей существенно выше, чем в [2, 6]. У Al с  $t_s = 25$  нс  $D_D > 2$ , то есть размерность линии профиля приближается к размерности плоскости. Очевидно, что для этих металлов  $D_f$  все же меньше, хотя и близка к двум. Завышение  $D_f$  происходит из-за неточного определения  $R_0$ .

Большие величины фрактальных размерностей, обнаруженные в нашей работе, можно объяснить двумя причинами.

Во-первых, в [7] указано, что значения  $D$ , близкие к единице, характерны для вязкого [2] и хрупкого [6] разрушения, а близкие к 2 — для разрушения смешанного типа. Таким образом, откольное разрушение исследованных в нашей работе материалов следует отнести к смешанному типу.

Во-вторых,  $D \approx 2$  свидетельствует о сильной извилистости профиля откольной поверхности, что говорит о разрушении путем зарождения и слияния микронесплошностей, то есть о его объемности. Именно такой характер разрушения присущ откольным явлениям [8].

Судя по тому, что разрушение алюминия носит определенно вязкий характер, второе объяснение выглядит более предпочтительным.

Следует отметить, что фрактальная размерность поверхности разрушения в случае  $t_g = 25$  нс существенно больше, чем при  $t_g = 43$  нс. Отсюда можно заключить, что и степень объемности разрушения возрастает при снижении длительности нагружающего импульса. Такое поведение можно интерпретировать как переход от разрушения путем слияния микродефектов к разрушению путем их размножения.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] K o s t r o n H. // Arch. Metallkd. 1946. V. 3. P. 193-203.
- [2] U n d e r w o o d E.E., B a n e r j i K, // J. Mat. Sci. and Eng. 1986. V. 80, P. 1-14.
- [3] R i c h a r d s o n L.F. Fractals: Form Chance and Dimensions, Ed. W.H. Freeman. San Francisco, CA, 1977. P. 32.
- [4] Г р о м о в Б.И., Е р о ф е е в М.В., К а л и н А.А., М о и с е е в В.А. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 26. С. 75-77.
- [5] А в е р и н В.И., Г р о м о в Б.И., Е р о ф е е в М.В. и др. // Изв. АН СССР. Серия „Физическая“. 1991. Т. 55. С. 1408-1415.
- [6] M e s c h o l s k y J.J., M a k i n T.J. // J. Mat. Sci. Lett. 1988. V. 7. P. 141-147.
- [7] W i l l i f a r d R.E. // Scr. met. 1988. V. 22. P. 1749-1754.
- [8] А п т у к о в В.Н. // ФГВ. 1985. Т. 21. № 5. С. 122-128.

Московский  
инженерно-физический институт

Поступило в Редакцию  
12 апреля 1993 г.