

- [1] Крейнделъ Ю.Е. В кн.: Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков. Новосибирск; Наука СО АН СССР, 1976, с. 113-129.
- [2] Жуков В.П., Демидов А.В. // Атомная энергия, 1985. Т. 59. В. 1. С. 29-33.
- [3] Жуков В.П., Болдин А.А. // Атомная энергия, 1987. Т. 63. В. 6. С. 375-379.
- [4] Попов Л.Е., Козлов Э.В. Механические свойства упорядоченных твердых растворов. М.: Металлургия, 1970. 270 с.

Поступило в Редакцию
12 апреля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 13 12 июля 1989 г.

05.1

КИНЕТИКА МНОГООЧАГОВОГО РАЗРУШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОТКОЛА

Э.Н. Беллендир, В.В. Беляев,
О.Б. Наймарк

В последнее время значительное внимание уделяется изучению кинетики разрушения и долговечности твердых тел при отколе. Как показывают экспериментальные исследования, разрушение в условиях импульсного растяжения носит многоочаговый характер. Множественное зарождение и рост микротрещин в волнах напряжений приводит к формированию большого количества очагов макроразрушений, которые затем объединяются в магистральную трещину. При квазистатическом нагружении разделение образца на части происходит вследствие развития одного, реже - двух очагов.

В настоящей работе на основе экспериментального и теоретического изучения кинетики накопления микротрещин и формирования очагов микротрещин в волнах напряжений показана связь закономерностей развития многоочагового разрушения с эффектом „динамической ветви“ при отколе. Экспериментальные исследования проведены на пластинах (диаметром 50 мм, толщиной 10 мм) и стержнях (диаметром 10-12 мм, длиной 100-200 мм) из полиметилметакрилата (ПММА), полистирола (ПС), ультрафарфора (85% Al_2O_3 , 15% SiO_2). В образцах ударом на легкогазовой разгонной установке возбуждался импульс сжатия, параметры которого регистрировались лазерным дифференциальным интерферометром [1]. По результатам экспериментальных исследований откольных разрушений

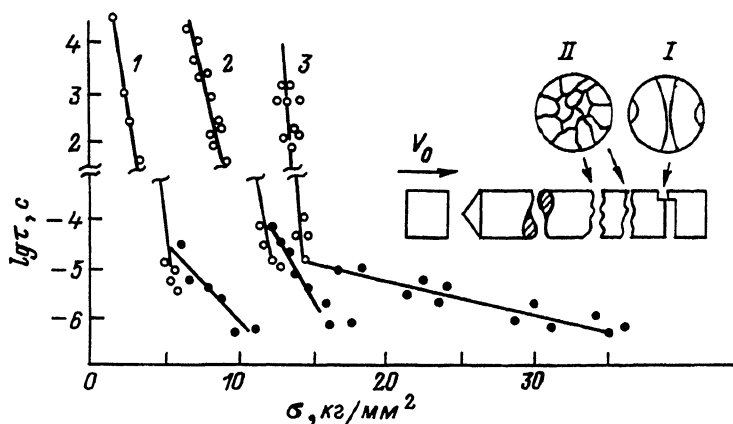


Рис. 1. Временные зависимости прочности полистирола (1), полиметилметакрилата (2), ультрафарфора (3). Вид разрушенного образца. 1 - развитие разрушения с поверхности, II - многоочаговое разрушение объема материала.

образцов были построены зависимости логарифмов долговечности τ от амплитуды растягивающих напряжений σ (рис. 1). На этом же рисунке приведены результаты квазистатических экспериментов. При значениях $\tau \approx 10^{-4}$ с, как показал фрактографический анализ поверхностей изломов, развитие разрушения происходит также, как при квазистатическом растяжении. К разделению образца на части приводит рост одной или двух микротрещин, зарождающихся на поверхности. Зависимости $\lg \tau(\sigma)$ при этом согласуются с временными зависимостями прочности исследованных материалов в условиях квазистатического нагружения. Увеличение уровня действующих напряжений приводит к отклонению зависимостей $\lg \tau(\sigma)$ в сторону больших долговечностей (рис. 1). Одновременно наблюдается переход от разрушения одноочагового с поверхности к характерному многоочаговому разрушению объема материала. Можно предположить, что полученные временные зависимости хрупких твердых тел в области импульсного растяжения связаны с переходом к многоочаговому внутреннему разрушению и определяются закономерностями процесса в ансамбле одновременно растущих и взаимодействующих микротрещин.

Методами термодинамики необратимых процессов с использованием статистико-термодинамического описания сред с микротрещинами получены уравнения состояния [2, 3]:

$$\sigma_{ik} = \zeta_1 e_{ik}^p - \zeta_2 \dot{\rho}_{ik}, \quad \Pi_{ik} = \zeta_2 e_{ik}^p - \zeta_3 \dot{\rho}_{ik}, \quad (1)$$

где σ_{ik} , e_{ik}^p , ρ_{ik} - тензоры напряжений, скоростей необратимых деформаций, плотности микротрещин; $\Pi_{ik} = \partial F / \partial \rho_{ik}$, F - свободная энергия среды с микротрещинами; ζ_i - константы материала; точкой обозначено дифференцирование по времени.

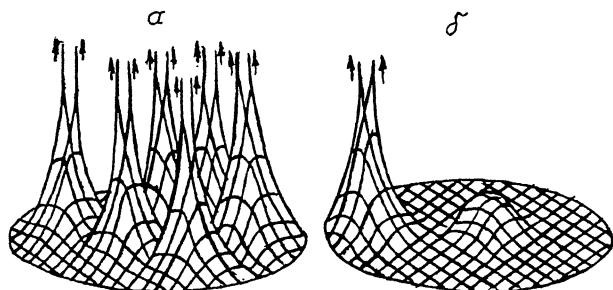


Рис. 2. Уровень плотности микротрещин в сечениях стержня: а - $h_1 = 16$ мм, б - $h_2 = 8$ мм.

Для исследования закономерностей кинетики накопления микротрещин и перехода к макроразрушению на основе уравнений (1) проведено численное моделирование эксперимента по соударению алюминиевой пластины со стержнем из ультрафарфора со скоростью $V_0 = 49$ м/с. В расчетах воздействие пластины было заменено импульсом сжатия треугольной формы с амплитудой 0.22 ГПа. и длительностью 8 мкс. Функция Π_{ik} , представленная в [2] через статистические интегралы, аппроксимировалась выражением $\Pi_{ik} = - (L \delta_{ik}^2 \exp \rho_{ik} + \gamma \nabla^2 \rho_{ik})$. Здесь ∇ - оператор Набла, γ - параметр нелокальности, L - константа материала. Для учета структурной неоднородности материала по сечению образца задавалось случайное распределение параметра L .

Как показали экспериментальные и численные исследования, на расстоянии $h_1 = 16$ мм от свободного торца стержня интенсивное нарастание растягивающих напряжений приводит к множественному зарождению, росту микротрещин и формированию многоочагового откольного разрушения. Затем, импульс растяжения малой амплитуды, осциллирующий в первоначально отколовшейся части, вызывает разрушение в сечении $h_2 = 8$ мм путем прорастания магистральной трещины с поверхности. Вид разрушенного образца схематически изображен на рис. 1. На рис. 2 представлены уровни объемной концентрации микротрещин в откольных сечениях, полученные в результате решения уравнений (1). Анализ кинетики накопления микротрещин в волне растяжения показал, что развитая стадия дисперсного разрушения характеризуется интенсивным взаимодействием микротрещин, что приводит к локализации разрушения. Процесс накопления микротрещин в областях локализации происходит в режиме взрывной неустойчивости и завершается формированием очагов макроразрушения. Характерно, что количество возникающих очагов уменьшается с падением интенсивности волны растяжения. В основе объяснения этого эффекта лежит анализ характерных времен двух процессов: нарастание растягивающих напряжений в сечении откола (τ_{σ}) и накопление объемной концентрации микротрещин (τ_{ρ}) В условиях интенсивного роста растя-

гивающих напряжений в сечении $k_1 (\tau_0 < \tau_p)$ поведение среды с микротрещинами характеризуется признаками систем, удаленных от состояния равновесия. Происходит активация практически всех зародышей микротрещин, и процесс роста P рост реализуется в режиме взрывной неустойчивости для всего спектра значений L . В этом случае осуществляется многоочаговый характер разрушения (рис. 2, а) При невысокой скорости нарастания σ в сечении $k_2 (\tau_0 > \tau_p)$ равновесие в системе устанавливается быстро. Ее поведение устойчиво вплоть до начала формирования очага макротрещины в области с повышенным исходным уровнем дефектности, характеризующейся максимальным значением параметра L (поверхность образца). В этих условиях макроскопическое разрушение наступает вследствие развития одного очага, сформировавшегося на поверхности (рис. 2, б). Заключительная стадия накопления микротрещин характеризуется слабой зависимостью от величины действующих напряжений и определяется взаимодействием кластеров из дисперсно разрушенных областей, являющихся очагами макротрещин. Признаки процесса, обусловленные взаимодействием микротрещин, определяют его важную черту – автомодельность заключительной стадии разрушения. Наблюдаемый в диапазоне длительностей нагружения 10^{-4} – 10^{-6} с переход от одноочагового разрушения к многоочаговому сопровождается значительным увеличением интенсивности взаимодействия микротрещин. При этом многократно усиливаются автомодельные признаки процесса дисперсного разрушения; время формирования очага макротрещины становится минимальным и определяется параметрами среды с микротрещинами. Указанные особенности кинетики дисперсного разрушения обуславливают слабую зависимость долговечности от амплитуды растягивающих напряжений в условиях откола и приводят к выделению динамической ветви при значениях $\tau \approx 10^4$ – 10^5 с (рис. 1). Автомодельные закономерности заключительной стадии накопления микротрещин в большей степени сказываются на поведении хрупких материалов, поскольку релаксационные процессы, связанные с пластическим течением, не оказывают существенного влияния. Так для ультрафарфора, наиболее хрупкого из трех испытанных материалов, характерна самая слабая зависимость долговечности от амплитуды напряжений (рис. 1).

С п и с о к л и т е р а т у р ы

[1] З л а т и н Н.А., П у г а ч е в Г.С., Б е л л е н д и р Э.Н., З и л ь б е р б р а н д Е.Л. // ЖТФ 1984. Т. 54. № 4. С. 797–802.
 [2] Н а й м а р к О.Б., Д а в ы д о в а М.М., П о с т н ы х А.М. // МКМ. 1984, № 2. С. 271–278.
 [3] Б е л я е в В.В., Н а й м а р к О.Б. // ПМТФ. 1987. № 1. С. 163–171.

Институт механики сплошных сред
 АН СССР,
 Пермь

Поступило в Редакцию
 9 февраля 1989 г.