

УДК 539.375

© 1996 г. Н.Ф. МОРОЗОВ, Ю.В. ПЕТРОВ

## **О ПОРОГОВЫХ СКОРОСТЯХ ЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ**

Исследована взаимосвязь характеристик эрозионного процесса с определяющими параметрами динамического разрушения твердых тел. Анализ проводится на основе структурно-временного критерия разрушения [1, 2]. Обсуждается схема, в которой пороговые скорости эрозионного разрушения поверхностей твердых тел соотнесены с инкубационным временем динамического разрушения материалов. Показано, что реализация этой схемы уже в простейшем приближении динамического контактного удара дает адекватные результаты.

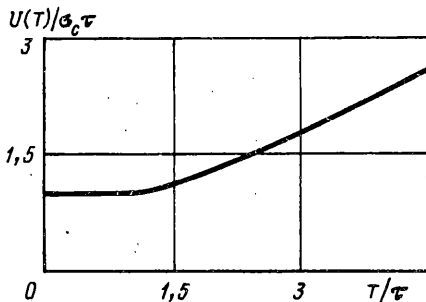
Исследование эрозии поверхностей при ударе твердых частиц неизбежно приводит к необходимости привлечения аппарата механики разрушения материалов. К сожалению использование традиционных квазистатических моделей механики разрушения не позволяет объяснять многие наблюдаемые эффекты. Во многих случаях это связано с тем, что применяемые классические критерии разрушения не соответствуют специфике эрозионного процесса. Эрозионное разрушение является процессом сугубо динамическим и, поэтому, не может быть эффективно проанализировано на основе традиционных статических критериальных соотношений, каким является, например, критерий критического напряжения.

Важнейшей особенностью эрозионного процесса является то, что при этом поверхность подвергается воздействию очень коротких динамических импульсов напряжения. Оценка возможности разрушения в таких условиях может быть проведена только на основе критериев, учитывающих специфику скоростного динамического разрыва твердых тел. Эффективным средством анализа эффектов быстрого разрушения является структурно-временной критерий [1-3]:

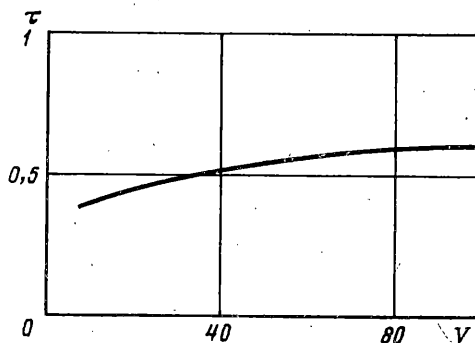
$$\int_{t-\tau}^t \sigma(s) ds \leq \sigma_c \tau \quad (1)$$

где  $\sigma_c$  – статическая прочность на разрыв. Согласно критерию, основной характеристикой динамического разрыва материалов является инкубационное время  $\tau$ , характеризующее процессы микроразрушения структуры. Критерий отражает дискретную природу динамического разрушения твердых тел [2].

На фиг. 1 показана получаемая при помощи структурно-временного критерия зависимость величины полного порогового импульса нагрузки от его длительности в условиях откола [4]. Эта зависимость показывает, что зная пороговые значения очень коротких импульсов нагрузки можно определить соответствующее данному материалу инкубационное время разрушения. Это приводит к возможности связать динамическое разрушение с явлением эрозии поверхностей в потоках газа, несущих твердые частицы. Фрактографический анализ показывает [5], что при эрозионном разрушении определяющим фактором является образование хрупких кольцевых трещин, производимых контактным динамическим взаимодействием летящих твердых частиц с поверхностью. Применяемые в экспериментах по эрозионному разрушению мелкие частицы радиусом порядка нескольких десятков или сотен микрон при



Фиг. 1



Фиг. 2

контактном взаимодействии с поверхностью производят чрезвычайно короткие разрывающие импульсы. Зная их характеристики, а также значение пороговой скорости удара (потока), при которой начинается эрозионное разрушение поверхности, можно определить элементарный «квант» разрушения и соответствующее ему инкубационное время. С другой стороны, зная определяющие параметры критерия разрушения можно рассчитывать принципиальные характеристики эрозионного процесса.

Покажем, как данная схема может быть реализована в простейшем приближении. Пусть сферическая твердая частица радиуса  $R$  со скоростью  $v$  падает на поверхность упругого полупространства. Следуя [6] с точностью до обозначений, приведем соответствующие рассуждения. Согласно классической схеме Герца считаем, что уравнение движения частицы (индентора) записывается в виде

$$md^2h/dt^2 = -P \quad (2)$$

где  $h$  — сближение,  $P$  — контактная сила,  $m$  — масса частицы. В классическом приближении считается, что соотношение между контактной силой и сближением при ударе остается таким же, как в статике. Это соотношение может быть представлено в виде

$$P(t) = k(R)h^{3/2}(t) \quad (3)$$

$$k(R) = 4/3 \sqrt{RE} / (1 - \nu^2) \quad (4)$$

В начальный момент  $dh/dt = v$ , тогда, интегрируя (2), имеем

$$dh/dt = (v^2 - 4kh^{5/2} / (5m))^{1/2} \quad (5)$$

Максимальное сближение  $h_0$  достигается при  $dh/dt = 0$ , откуда

$$h_0(v, R) = [5mv^2 / (4k)]^{2/5} \quad (6)$$

Для вычисления продолжительности удара проинтегрируем (5) от начала взаимодействия до момента максимального сближения

$$\int_0^{h_0} \frac{dh}{(v^2 - 4kh^{5/2} / (5m))^{1/2}} = \frac{t_0}{2}$$

где  $t_0(v, R)$  — полная длительность удара. Отсюда имеем

$$t_0 = \frac{2h_0}{v} \int_0^1 \frac{d\gamma}{(1 - \gamma^{5/2})^{1/2}} = 2,94 \frac{h_0}{v} \quad (7)$$

Численное интегрирование позволяет построить зависимость функции сближения от времени  $h(t, v, R)$ . Эта зависимость с высокой точностью аппроксимируется выражением [6]:

$$h(t) = h_0 \sin(\pi t / t_0) \quad (8)$$

Зависимость от времени максимального разрывающего напряжения в точках поверхности, примыкающих к контактной площадке, вычисляется по формуле [7]:

$$\sigma(v, R, t) = \frac{1-2\nu}{2} \frac{P(t, v, R)}{\pi a^2(t, v, R)} \quad (9)$$

где радиус контактной площадки  $a(t, v, R)$  определяется как

$$a(t) = \left[ 3P(t, v, R)(1-\nu^2) \frac{R}{4E} \right]^{1/3} \quad (10)$$

а контактная сила  $P(t, v, R)$  находится при помощи (3)–(8).

Пусть  $v$  – пороговая скорость частицы, при которой происходит разрыв материала. Введем функцию

$$f(v, R, \tau) = \max_t \int_{t-\tau}^t \sigma(v, R, s) ds - \sigma_c \tau$$

В соответствии со структурно-временным критерием (1) определим инкубационное время  $\tau$  как положительный корень уравнения

$$f(v, R, \tau) = 0 \quad (11)$$

при заданных значениях  $v$  и  $R$ .

Полученные формулы могут быть использованы для расчета инкубационного времени на основе экспериментальных данных о пороговых скоростях эрозионного разрушения поверхностей.

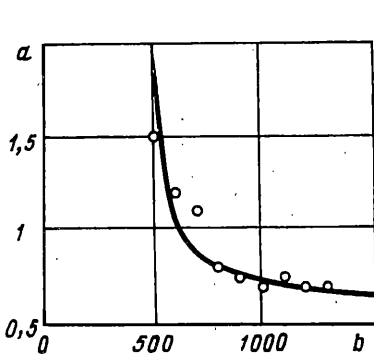
Пусть алюминиевый сплав В95 с механическими параметрами  $E = 73$  ГПа,  $\nu = 0,3$ ,  $\sigma_c = 456$  МПа подвергается эрозионному разрушению при характеристиках эродента  $R = 150$  мкм,  $\rho = 2400$  кг/м<sup>3</sup> ( $m = 3\pi\rho R^3/4$ ).

На фиг. 2 показана рассчитанная при указанных параметрах зависимость инкубационного времени  $\tau$  от пороговой скорости эрозионного разрушения. Видно, что в достаточно широком диапазоне скоростей, реально наблюдаемых для алюминиевых сплавов, методика дает адекватные результаты.

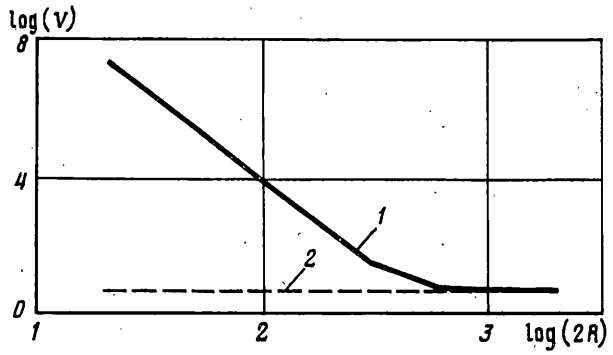
Действительная пороговая скорость частиц, при которой начинается процесс эрозионного разрушения поверхности, должна определяться экспериментально. Для алюминиевого сплава с вышеприведенными механическими свойствами она оказывается равной (см. [8, 9])  $v = 33$  м/с. Применение вышеприведенных формул дает следующие значения характеристик ударного взаимодействия частиц с поверхностью:  $t_0 = 0,29$  мкс,  $h_0 = 3,46$  мкм. Расчет показывает, что функция  $f(v, R, \tau)$  имеет единственный положительный корень. Вычисленное при полученных данных инкубационное время материала  $\tau$  оказывается равным 0,5 мкс.

Полученное значение инкубационного времени позволяет построить диаграмму временной зависимости прочности для указанного сплава. На фиг. 3 приведена соответствующая расчетная кривая, включающая как статическую, так и динамическую ветви. Приведенные на том же рисунке экспериментальные точки, взятые из экспериментов по откольному разрушению алюминиевого сплава В95 [10], показывают эффективность приведенной методики оценки структурного времени на основе данных об эрозии.

С другой стороны, зная инкубационное время материала, например, из опытов по



Фиг. 3



Фиг. 4

откольному разрушению, можно определять принципиальные характеристики эрозионного процесса. На фиг. 4 (кривая 1) представлена рассчитанная при  $\tau = 0,5$  мкс зависимость пороговой скорости эрозионного разрушения сплава В95 от радиуса частиц эродента. Как показывают приведенные результаты эта зависимость также характеризуется статической и динамической ветвями. Статический участок характеризуется слабой зависимостью пороговой скорости от диаметра частиц эродента. Напротив, динамическая ветвь показывает быстрый рост пороговых скоростей с уменьшением их размера. Причем, имеется некоторый характерный размер, в рассмотренном случае порядка сотен микрон, которому отвечает достаточно быстрый переход от квазистатического к динамическому режиму. Построенная теоретическая кривая качественно соответствует известным экспериментальным наблюдениям [11]. Заметим, что расчет с применением традиционного критерия критического напряжения (фиг. 4, кривая 2) не дает объяснения наблюдаемому поведению пороговых скоростей эрозионного разрушения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 94-01-01393-а) и Международного научного фонда (грант NW3000).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. Динамическая вязкость разрушения в задачах инициирования роста трещин // Изв. АН СССР. МТТ. 1990. № 6. С. 108–111.
2. Петров Ю.В. О «квантовой» природе динамического разрушения хрупких сред // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321. № 1. С. 66–68.
3. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В. О концепции структурного времени в теории динамического разрушения хрупких материалов // Докл. РАН. 1992. Т. 324. № 5. С. 964–967.
4. Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Уткин А.А. Об анализе откола с позиций структурной механики разрушения // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 2. С. 276–279.
5. Эванс А., Рафф А., Виберхорн С. и др. Эрозия/Под ред. К. Присс. М.: Мир, 1982. 464 с.
6. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. 222 с.
7. Lawn B.R., Wilshaw T.R. Indentation fracture: principles and application // J. Mater. Sci. 1975. V. 10. № 6. P. 1049–1081.
8. Урбанович Л.И., Крамченков Е.М., Чуносов Ю.Н. Исследование низкотемпературной газообразной эрозии // Трение и износ. 1992. Т. 13. № 6. С. 1052–1056.
9. Urbanovich L.I., Morozov N.F., Kramchenkov E.M., Chunosov Y.N., Petrov Y.V., Utkin A.A. Influence of Mechanical and Physical Properties of Both Solid Particles and Target Materials on the Critical Impact Velocity // Proc. of the Int. Conf. 1994.
10. Златин Н.А., Пугачев Г.С., Мочалов С.М., Брагов А.М. Временная зависимость прочности металлов при долговечностях микросекундного диапазона // Изв. АН СССР. ФТТ. 1975. Т. 17. Вып. 9. С. 2599–2602.
11. Полежаев Ю.В. Теплогазодинамическая обработка летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 1986. 68 с.