

О влиянии геометрической формы абразивных частиц на пороговую скорость эрозионного разрушения

В. И. Смирнов

Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург, Россия

Оценено влияние геометрической формы частиц эродента на пороговую скорость разрушения. Показано, что при изменении размеров частиц эродента тип разрушения может изменяться с хрупкого на вязкое, и наоборот. Приведены данные сравнительного анализа эрозионной стойкости некоторых металлических материалов с применением структурно-временного критерия разрушения на примере удара единичной абразивной частицы цилиндрической формы о поверхность упругого полупространства. Используется классическая теория удара Герца.

Ключевые слова: динамическое разрушение, эрозия, критерий разрушения, структурное время, хрупковязкий переход, пороговые скорости.

Обозначения

R	– радиус цилиндра
E	– модуль Юнга
ν	– коэффициент Пуассона
h_0	– глубина внедрения
t_0	– продолжительность удара
m	– масса частицы
v	– скорость падения частицы
P	– контактная сила
r, z, θ	– цилиндрические координаты
$\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{rz}, \sigma_{r\theta}, \sigma_{z\theta}$	– компоненты тензора напряжений
τ	– инкубационное время хрупкого разрушения
σ_c	– предел статической прочности при растяжении
v_*	– пороговая скорость разрушения
T_k	– интенсивность касательных напряжений
α	– константа материала
σ_Y	– предел текучести при квазистатическом одноосном растяжении
τ_Y	– инкубационное время текучести
M	– коэффициент формы частицы

Исследование различных видов разрушения деталей машин и устройств предполагает, в частности, изучение процессов эрозии металлов, сплавов и покрытий для разработки рациональных методов повышения эрозионной стойкости материалов, подверженных воздействию твердых, жидких и газо-

образных частиц. В данной работе рассматриваются проблемы моделирования разрушения конструкционных материалов на примере газопылевой эрозии.

Адекватное моделирование процесса эрозионного разрушения материалов требует привлечения современных средств экспериментальной и вычислительной техники. В то же время актуальной задачей является формулировка приемлемых для инженерной практики принципов, позволяющих проводить качественный и количественный анализы соответствующих эффектов.

При изучении эрозии поверхностей при ударе твердых частиц вполне естественным представляется применение аппарата механики разрушения материалов. Однако использование традиционных квазистатических моделей механики разрушения не позволяет в полной мере объяснить наблюдаемые эффекты. Во многих случаях это связано с тем, что классические критерии разрушения не соответствуют специфике эрозионного процесса. Эрозионное разрушение по своей сути – процесс динамический и поэтому не может быть эффективно проанализировано на основе традиционных статических критериальных соотношений, каковым является, например, критерий критического напряжения.

Особенность эрозионного процесса состоит в том, что поверхность материала подвергается воздействию очень коротких динамических импульсов напряжения. Возможность разрушения в таких условиях может быть оценена только на основе критериев, учитывающих скоростной характер динамического разрыва твердых тел. Эффективным аналитическим инструментом в таких случаях оказывается структурно-временной подход, сформулированный применительно к рассматриваемой проблеме в работах [1, 2].

Традиционно задача исследования эрозионного разрушения заключается в определении объема уносимой массы поверхности материала. В данной работе представляет интерес лишь начальная стадия процесса разрушения, а именно: критическая (пороговая) скорость удара частиц абразива, при которой возникает повреждение поверхности. При такой постановке задачи достаточно рассмотреть падение одиночной микрочастицы по нормали к поверхности материала-мишени.

Фрактографический анализ показал [3], что при эрозионном разрушении определяющим фактором является образование хрупких кольцевых трещин вследствие контактного динамического взаимодействия летящих твердых частиц с поверхностью материала-мишени. Кроме того, часто в области контакта абразивной частицы с поверхностью экспериментально наблюдается вязкий тип разрушения, который проявляется в форме пластических отпечатков. Поэтому представляет практический интерес рассмотреть оба типа разрушения и возможность их смены при изменении размеров абразивных частиц.

В большинстве работ по эрозионному износу форма абразивных частиц аппроксимируется сферической. Однако полезно учитывать и другие, по крайней мере, простейшие формы частиц эродента.

Для оценки влияния геометрической формы частиц на пороговую скорость эрозионного разрушения рассмотрим нормальный удар торцом части-

цы в виде жесткого кругового цилиндра о поверхность упругого полу-пространства. Аналогичная задача для сферической частицы в рамках классической теории контактного удара Герца изучена ранее [4]. Здесь приведем лишь выражения для основных расчетных характеристик: глубины внедрения; продолжительности удара и радиального напряжения на границе контактной площадки.

Соотношение между контактной силой P и сближением h имеет вид

$$P(t) = kh(t), \quad k = \frac{2RE}{1-\nu^2}, \quad (1)$$

где R – радиус цилиндра, равный радиусу контактной площадки; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона.

Далее, выполняя те же преобразования, что и в случае сферической частицы [4], можно получить формулы для вычисления максимальной глубины внедрения

$$h_0 = \sqrt{\frac{mv^2}{k}} \quad (2)$$

и продолжительности удара

$$t_0 = \pi \frac{h_0}{v} = \pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (3)$$

где m и v – соответственно масса и скорость падения частицы.

Зависимость сближения от времени определяется из выражения

$$h(t) = h_0 \sin\left(\frac{\pi t}{t_0}\right), \quad (4)$$

Отметим, что в случае цилиндра продолжительность удара на 6,7% больше, чем при ударе шарика (при одинаковых h_0 и v).

Радиальное растягивающее напряжение, достигающее максимума на границе контактной площадки при подходе с внешней стороны, можно вычислить по формуле [5]

$$\sigma_r(v, R, t) = \frac{1-2\nu}{2} \frac{P(t)}{\pi R^2}, \quad z = 0, \quad r \rightarrow R + 0, \quad (5)$$

где $P(t)$ – контактная сила, определяемая согласно выражению (1); r , z – цилиндрические координаты.

Рассмотрим два типа разрушения: хрупкое и вязкое.

Хрупкое разрушение. Вероятность появления кольцевых трещин на границе контактной площадки можно оценить с помощью следующего критерия динамического разрушения [6]:

$$\max_t \int_{t-\tau}^t \sigma(s) ds \leq \sigma_c \tau, \quad (6)$$

где τ – инкубационное время разрушения; σ_c – квазистатическая прочность материала; $\sigma(t)$ – максимальное растягивающее напряжение.

Согласно критерию (6), основной характеристикой динамического разрушения материалов является инкубационное время τ , характеризующее процессы микроразрушения структуры. Критерий (6) отражает дискретную природу динамического разрушения твердых тел [7].

При подстановке (5) в (6) получим

$$\frac{1-2\nu}{2} \frac{\sqrt{km}}{\sigma_c \pi R^2} \frac{t_0}{\pi} v \max_t \left[2 \sin \frac{\pi(2t-\tau)}{2t_0} \sin \frac{\pi\tau}{2t_0} \right] - \tau = 0. \quad (7)$$

Максимум выражения в квадратных скобках достигается при $t = (t_0 + \tau)/2$. Подставляя это значение в (7) с учетом (3), имеем

$$(1-2\nu) \frac{mv_*}{\sigma_c \pi R^2} \sin \frac{\pi\tau}{2t_0} - \tau = 0,$$

откуда находим пороговую скорость разрушения v_* :

$$v_* = \begin{cases} \frac{\sigma_c \pi R^2 \tau}{(1-2\nu)m \sin \frac{\pi\tau}{2t_0}}, & \tau < t_0; \\ \frac{\sigma_c \pi R^2 \tau}{(1-2\nu)m}, & \tau \geq t_0. \end{cases} \quad (8)$$

Для сравнения пороговых скоростей разрушения при ударе цилиндрических и сферических частиц выразим массу цилиндра $m_{\text{ц}}$ через высоту H таким образом, чтобы его масса равнялась массе шара $m_{\text{ш}}$. Поскольку $m_{\text{ц}} = \rho \pi R^2 H$, $m_{\text{ш}} = \rho \frac{4}{3} \pi R^3$ (ρ – плотность абразивной частицы), то $H = 4R/3$. Таким образом,

$$v_* = \begin{cases} \frac{3\sigma_c \tau}{4(1-2\nu)\rho R \sin \frac{\pi\tau}{2t_0}}, & \tau < t_0; \\ \frac{3\sigma_c \tau}{4(1-2\nu)\rho R}, & \tau \geq t_0, \end{cases} \quad (9)$$

где продолжительность удара (контакта) определяется по формуле

$$t_0 = \pi R \sqrt{\frac{2(1-\nu^2)\pi\rho}{3E}}. \quad (10)$$

Вязкое разрушение. Для оценки склонности материала к образованию местных пластических деформаций и кратеров используем динамический критерий текучести [8]:

$$\max_t \int_{t-\tau_Y}^t \left(\frac{\sqrt{3}T_k(s)}{\sigma_Y} \right)^\alpha ds \leq \tau_Y, \quad (11)$$

где $T_k(t)$ – интенсивность касательных напряжений,

$$T_k^2(t) = \frac{1}{6} \{ [\sigma_r(t) - \sigma_\theta(t)]^2 + [\sigma_\theta(t) - \sigma_z(t)]^2 + [\sigma_z(t) - \sigma_r(t)]^2 \} + \sigma_{rz}^2(t) + \sigma_{r\theta}^2(t) + \sigma_{z\theta}^2(t); \quad (12)$$

$\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_{rz}, \sigma_{r\theta}, \sigma_{z\theta}$ – компоненты тензора напряжений в цилиндрической системе координат; α – экспериментально определяемая константа материала; σ_Y – предел текучести при квазистатическом одноосном растяжении; τ_Y – инкубационное время текучести.

Поскольку задача осесимметрична, то $\sigma_{r\theta} = \sigma_{z\theta} = 0$. На границе контактной площадки, при подходе с внешней стороны, имеем [5] $\sigma_z = \sigma_{rz} = 0$, $\sigma_\theta = -\sigma_r$ ($z = 0, r \rightarrow R + 0$). Следовательно,

$$T_k(v, R, t) = 2\sigma_r(v, R, t)/\sqrt{6}. \quad (13)$$

Подставив значение $T_k(v, R, t)$ из (13) в критериальное равенство (11), определим численно пороговую скорость разрушения при различных радиусах частиц.

На рис. 1 представлены зависимости скоростей хрупкого и вязкого разрушения алюминиевого сплава В95 от радиуса частиц с параметрами $\tau = 0,71$ мкс [1], $\tau_Y = 10$ мкс и $\alpha = 8$ (оценки параметров τ_Y и α приведены в работе [9]). Как видно, результаты расчета качественно согласуются с экспериментальными данными [10] и принципиально не отличаются от полученных для сферических частиц [4, 6]. Однако смена механизма разрушения с вязкого на хрупкое начинается в случае более высокой пороговой скорости $v_* \approx 643$ м/с при радиусе частицы $R \approx 395$ мкм (для сферической частицы $v_* = 56$ м/с при $R \approx 140$ мкм). Это вполне объяснимо: шарик легче вдавить в поверхность твердого тела, чем цилиндр плоским торцом, что подтверждается также существенным различием между величинами критической нагрузки при статическом контактном взаимодействии шара и цилиндра с упругим полупространством. Такую нагрузку естественно оценивать по величине растягивающих радиальных напряжений, которые, как показывают эксперименты, приводят к образованию кольцевых трещин, появляющихся на поверхности твердого тела первыми (результаты экспери-

ментов согласуются с аналитическими решениями соответствующих контактных задач для шара и цилиндра: в обоих случаях на границе контактной площадки радиальное напряжение – растягивающее, $\sigma_r > 0$, окружное – сжимающее, $\sigma_\theta < 0$).

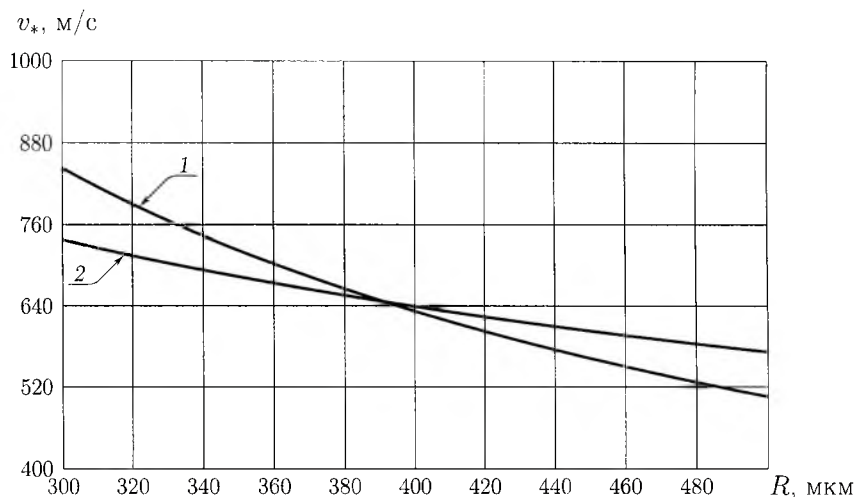


Рис. 1. Зависимости скоростей хрупкого (1) и вязкого (2) разрушения алюминиевого сплава В95 от радиуса частиц.

Предельную нагрузку оценим по статическому критерию прочности:

$$\sigma_r(r = a, z = 0) \leq \sigma_c. \quad (14)$$

Для шара имеем [11]

$$\sigma_r(r = a, z = 0) = \frac{1-2\nu}{2} \frac{P}{\pi a^2}, \quad a = \left[3P(1-\nu^2) \frac{R}{4E} \right]^{1/3},$$

для цилиндра [5] –

$$\sigma_r(r = R, z = 0) = \frac{1-2\nu}{2} \frac{P}{\pi R^2},$$

где a – радиус контактной площадки.

Для корректности сравнения σ_r для этих случаев положим $a = R$. Тогда согласно (14) получим следующее значение предельной нагрузки:

для шара:

$$P_* = \left(\frac{2\pi\sigma_c}{1-2\nu} \right)^3 \left[\frac{3}{4} (1-\nu^2) \frac{R}{E} \right]^2,$$

для цилиндра:

$$P_* = \frac{2\pi R^2 \sigma_c}{1-2\nu}.$$

Зависимость критической нагрузки P_* от радиуса индентора R показана на рис. 2 (материал поверхности – сплав В95). Как видно, в случае цилиндра незначительное увеличение радиуса индентора вызывает резкий прирост величины предельной нагрузки, в то время как для шара наблюдается плавное ее повышение.

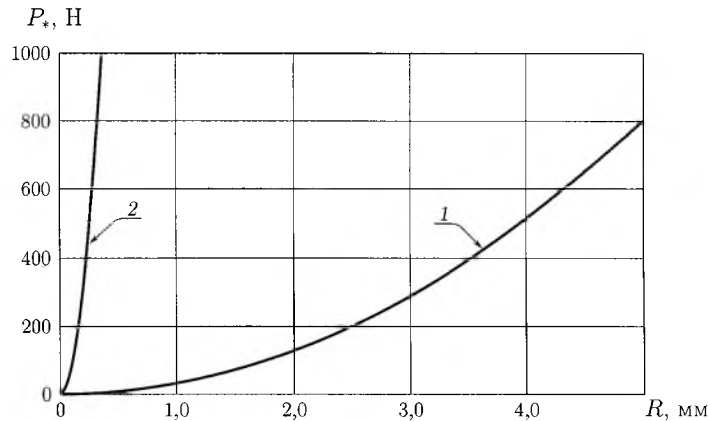


Рис. 2. Критическая нагрузка при индентировании шаром (1) и цилиндром (2).

Таким образом, результаты расчетов свидетельствуют о существенном влиянии геометрической формы эрозивных частиц на пороговую скорость разрушения. Отметим, однако, что с практической точки зрения нормальный удар торцом цилиндрической частицы о поверхность полупространства является сильной идеализацией. На практике в процессе эксплуатации машин, механизмов и инструментов приходится иметь дело с абразивными частицами неправильной геометрической формы, которая в расчетах чаще всего аппроксимируется сферической. Поэтому можно предположить, что влияние формы частиц на интенсивность ударно-абразивного разрушения будет не столь заметным.

Полученные выводы качественно согласуются с результатами экспериментов [12]. В работе [12] для количественной оценки влияния формы частиц на интенсивность газоабразивного изнашивания предложено использовать так называемый коэффициент формы частицы M , определяемый из выражения $M = N_c/r_c$, где N_c – среднее число выступов; r_c – средний радиус округления вершины угла. Установлена практически линейно возрастающая зависимость интенсивности износа от величины коэффициента формы. Для сферической частицы коэффициент $M = 1/R$, для цилиндрической частицы $M = 0$ – в случае удара торцом или боковой поверхностью и $M = \infty$ – в случае удара углом.

Знание величины пороговой скорости эрозивного разрушения позволяет оптимизировать процесс отбора конструкционных материалов, наиболее устойчивых к данному виду разрушения. Очевидно, что чем выше пороговая скорость разрушения, тем более прочным является конкретный материал при заданном размере абразивных частиц.

Выполним краткий сравнительный анализ эрозионной стойкости некоторых материалов. Экспериментальные данные для пороговых скоростей

разрушения ряда конструкционных материалов содержатся в работе [13]. Материал частиц – кварцевый песок (радиус $R = 65...258$ мкм), материал мишени – металлы и их сплавы (никель, алюминий, цинк, сталь 12Х18Н10Т, сплавы Д16Т, ВТ1 и др.). Величина пороговой скорости разрушения v_* приведена в таблице. Там же представлены значения инкубационного времени хрупкого разрушения τ для каждого материала, вычисленные для сферической частицы способом, аналогичным изложенному ранее [4].

Механические характеристики материалов

Материал мишени	σ_c , МПа	ν	E , ГПа	R , мкм	v_* , м/с	τ , мкс
Zn	450	0,25	108	258	22,98	1,64
Al	150	0,33	74	258	12,65	2,60
Ni	1040	0,29	214	258	21,27	0,78
Fe	335	0,27	211	258	22,48	2,67
ВТ1	1050	0,28	110	258	19,26	0,61
Mo	275	0,32	329	258	25,23	3,13
Nb	400	0,40	105	258	22,87	0,77
AISI 310	440	0,29	380	75	15,16	0,51
Д16Т	510	0,33	71	65	38,11	0,23
12Х18Н10Т	560	0,30	205	65	23,34	0,35

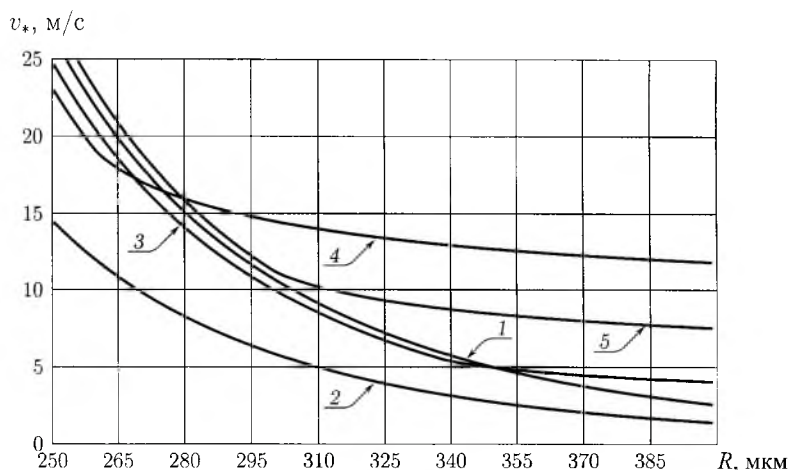


Рис. 3. Пороговые скорости эрозионного разрушения для различных материалов: 1 – Zn; 2 – Al; 3 – Ni; 4 – сплав ВТ1; 5 – Nb.

Зависимость пороговой скорости эрозионного разрушения от радиуса частиц эродента для некоторых материалов (таблица) иллюстрирует рис. 3. Видно, что в диапазоне радиуса частиц 250...400 мкм наименьшей эрозионной стойкостью обладает алюминий, так как у него самая низкая пороговая скорость разрушения. Если алюминий исключить из рассмотрения, то из оставшихся материалов при радиусе частиц эродента > 280 мкм наиболее стойким оказывается титановый сплав ВТ1, который при радиусе частиц эродента < 270 мкм становится самым непрочным. Таким образом, очевидна возможность рационального выбора материалов для конструкций, работа-

ющих в различных скоростных режимах с разным размером частиц эродента. Отсюда следует также вывод о возможности управления скоростным режимом и (или) изменения радиуса абразивных частиц с целью увеличения (уменьшения) интенсивности эрозионного разрушения.

Резюме

Оцінено вплив геометричної форми частинок еродента на порогову швидкість руйнування. Показано, що зі зміною радіуса частинок еродента можлива зміна типу руйнування з крихкого на в'язке, і навпаки. Наведено результати порівняльного аналізу ерозійної стійкості деяких металічних матеріалів з використанням структурно-часового критерію руйнування на прикладі удару одиначної абразивної частинки циліндричної форми. Використовується класична теорія удару Герца.

1. Морозов Н. Ф., Петров Ю. В. О пороговых скоростях эрозионного разрушения поверхностей твердых тел // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 1996. – № 3. – С. 72 – 75.
2. Петров Ю. В. “Квантовая” макромеханика динамического разрушения твердых тел / РАН. Ин-т пробл. машиноведения. – Препр. – СПб., 1996. – 51 с.
3. Эрозия / Под ред. К. Присс. – М.: Мир, 1982. – 464 с.
4. Петров Ю. В., Смирнов В. И. О пороговых скоростях эрозионного разрушения // Тр. науч.-техн. конф. “Новожиловские чтения”. – СПб., 1998. – С. 105 – 109.
5. Петров Ю. В., Смирнов В. И. Об определении контактной прочности хрупких конструкционных материалов // Транспорт: наука, техника, управление. – 1998. – № 10. – С. 16 – 23.
6. Морозов Н. Ф., Петров Ю. В., Смирнов В. И. Хрупко-вязкий переход при эрозионном разрушении // Докл. РАН. – 2002. – 385, № 1. – С. 64 – 66.
7. Петров Ю. В. О “квантовой” природе динамического разрушения хрупких сред // Докл. АН СССР. – 1991. – 321, № 1. – С. 66 – 68.
8. Груздков А. А., Петров Ю. В., Смирнов В. И. Инвариантная форма критерия динамической текучести металлов // Физика твердого тела. – 2002. – 44, вып. 11. – С. 1987 – 1989.
9. Груздков А. А., Петров Ю. В. О температурно-временном соответствии при высокоскоростном деформировании металлов // Докл. РАН. – 1999. – 364, № 6. – С. 766 – 768.
10. Полежаев Ю. В., Романченков В. П., Чирков И. В., Шебеко В. Н. Расчетная модель процесса эрозионного разрушения композиционного материала // Инж.-физ. журн. – 1979. – 37, № 3. – С. 395 – 404.
11. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. – 509 с.

12. *Тадольдер Ю. А.* Влияние геометрии абразивного зерна на интенсивность изнашивания металлов в потоке абразивных частиц: Тр. Талл. политехн. ин-та, Сер. А. – 1966. – Вып. 237. – С. 15 – 22.
13. *Урбанович Л. И., Крамченков Е. М.* Влияние режимных факторов на пороговую скорость соударения при газоабразивной эрозии // Исследования по упругости и пластичности. – СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 1999. – Вып. 18. – С. 263 – 265.

Поступила 14. 06. 2005