

05;11
©1992

ОТКОЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭРОЗИОННОГО ИЗНАШИВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ЧАСТИЦ

С. Н. Буравова

Повреждаемость при импульсном нагружении является результатом проявления сжимаемости твердого тела. Импульс сжатия при каждом ударе распространяется внутри конуса сжимаемости, что определяет локальность повреждения в преграде. В зоне контакта образуется продольная канальная микро- или макротрещина, обусловленная фокусировкой волн разгрузки с источником на боковых гранях частицы. При многократном нагружении под зоной контакта возникает продольный множественный откол, состоящий из одной или нескольких кольцевых трещин, локализуемых вокруг канальной макротрещины. Фрагментация материала из зоны множественного откола создает впадину на поверхности преграды. Когда угол наклона стенки впадины становится меньше угла конуса сжимаемости, импульс сжатия, возникающий при ударе частицы в дно впадины, приобретает способность проникать в преграду через стенку. Прошедший импульс при выходе на поверхность генерирует поперечную зону высоких растягивающих напряжений. Лицевой откол, являющийся основной причиной потери материала при эрозии, обусловлен интерференцией волн разгрузки (источник на стенке впадины и лицевая поверхность преграды).

Работа посвящена установлению физических закономерностей процессов, сопровождающих ударное нагружение поверхности потоком частиц. За последние сорок лет интенсивно проводится изучение материаловедческого аспекта проблемы эрозии. На высоком уровне описаны структурные изменения, происходящие с материалом, однако причина, их вызывающая, остается неизвестной. Установлено, что сопротивляемость эрозии слабо коррелирует с пластичностью, практически не зависит от трещиностойкости, ударной вязкости, твердости, прочности на разрыв [1] и от других известных параметров теории упругости и пластичности. Эрозионное изнашивание на инкубационной стадии проявляется в изменении геометрии поверхности. Возникающие под ударами частиц впадины-воронки создают волнистый рельеф с равномерным чередованием выступов и впадин. На дне впадин обнаруживаются поры, пустоты, которые в глубь материала распространяются в виде макротрещин [2]. В конце индукционного периода появляется незначительный унос материала. Стационарная стадия изнашивания характеризуется потерей материала. Удивительной оказалась форма отделяющихся частиц [3] — пластинообразная, хлопьевидная.

Одновременно снакоплением фактического материала предпринимались многочисленные попытки теоретически осмыслить экспериментальный материал. Предложено множество моделей эрозии [1]. Как правило, они основаны на традиционной механике разрушения, согласно которой концентраторы, дефекты, статистически располагающиеся на поверхности, являются источниками повреждаемости твердого тела [3,4]. Большая группа моделей феноменологического характера за основу принимает процессы-аналоги, например микрорезание [5], тепловое циклическое разрушение [6]. Однако все существующие модели при математическом описании используют подгоночные параметры, определяемые из экспериментов по эрозии. Поэтому эти модели являются полуэмпирическими, не способны описать экспериментальные факты (образование кратера, кольцевых валиков или трещин вокруг зоны контакта, формирование волнистого рельефа поверхности, хлопьевидность продуктов изнашивания), не могут установить параметры, влияющие на повреждаемость, и, главное, для чего разрабатываются модели, не способны предложить принцип построения защиты от разрушения поверхностного слоя.

В работе предлагается новый подход к проблеме эрозии. В сложной совокупности взаимосвязанных процессов, сопутствующих изнашиванию (упрочнение, деформирование, повреждаемость, преграды, разрушение частиц, массоперенос и др.), устанавливается ведущий процесс. Таким процессом, лимитирующим все остальные, является высокоскоростное деформирование.

Описание высокоскоростного деформирования с помощью физики ударных волн в отличие от квазистатической механики разрушения, традиционно используемой при изучении эрозии, позволяет обобщить многочисленный фактический материал и построить модель, способную прогнозировать повреждаемость поверхностного слоя в зависимости от условий проведения эксперимента.

Рассмотрение процесса периодического нагружения поверхности частицами дает возможность установить причины, приводящие к разрушению поверхностного слоя. Сопряженная задача взаимодействия индивидуальной частицы с преградой решается в двумерной постановке. Двумерность задачи позволяет получить приближенное аналитическое решение. Удар частицы сопровождается образованием импульсов сжатия в частице и преграде (рис. 1). Одновременно с ударными волнами возникают центрированные цилиндрические волны разгрузки, источником которых является периметр зоны контакта (правильнее сказать, свободное пространство). Фронт ударной волны, проходя через зону разгрузки, ослабевает и искривляется.

Взаимодействие фронта ударной волны с волной разгрузки, источником которой является свободная поверхность, рассмотрено в работе [7] для подводных взрывов. Этот подход оказался пригодным для распространения импульса сжатия в свободном пространстве мишени. Форма искривленного фронта ударной волны в переменных $X = \left(\frac{x}{r}\right) - 1$, $Y = \frac{(y-1)}{\tau}$, где x, y — координаты, нормализованные к радиусу частицы r_0 ; $\tau = c_0 t / r_0$ — безмерное время; c_0 — скорость звука невозмущенного материала, оказалась не зависящей от времени

$$X = \frac{\sigma_0}{4} + \frac{\sqrt{\sigma_0}}{2} Y - \frac{1}{4} Y^2.$$

Радиальная составляющая скорости перемещения боковой грани v (в направлении y) равна

$$v = \frac{2}{n+1} c_0 \sigma_B [\cos(\varphi_0 - 90^\circ) + \sqrt{\sigma_0} - \sqrt{\sigma_B}].$$

Радиальная составляющая v характеризует поперечное расширение частицы за счет сжимаемости. Если она превышает фазовую скорость перемещения границы контакта W , $W = V_0 \operatorname{tg}(\varphi_0 - 90^\circ)$, то сжатый материал “вытекает” за границу контакта, образуя поперечную “струи”. Критерием поперечного струйного растекания, поиски которого продолжаются до сих пор при изучении дождевой эрозии [1], является равенство скорости расширения сжатого материала в частице и скорости перемещения границы контакта. Расчет показывает, что струйное растекание возникает при углах наклона боковых граней порядка $95 - 96^\circ$. Скорость поперечной “струи” за счет двустадийного характера расширения оказывается существенно меньше скорости удара и составляет 0.1–0.2 от скорости удара. Экспериментально наблюдаемая “сверхскорость” растекания капель [1] является измеренной фазовой скоростью границы контакта.

Прохождение импульса сжатия по материалу, интенсивность которого превышает предел упругости Гюгонио P_Γ , $(\sigma_0 > \sigma_\Gamma, \sigma_\Gamma = \frac{n+1}{2} \frac{P_\Gamma}{P_0 c_0^2})$, изменяет структуру материала, он становится прочнее, упрочение происходит внутри конуса сжимаемости. Глубина, на которой ударная волна перерождается в упругую и пластическое деформирование прекращается, определяет толщину упроченного слоя. Интенсивное затухание ударной волны происходит в зоне интерференции разгрузки. Столкновение волн разгрузки не имеет аналитического решения. Однако учитывая, что в области взаимодействия параметры слабо зависят от координаты, а траектории состояния искривляются мало, глубину затухания x_* можем оценить по моменту встречи на фронте ударной волны двух траекторий состояния, характеризующихся параметрами σ_0 и σ^* ,

$$x_* \left[\frac{\sigma_0}{1 + 0.5\sigma_0} + \frac{2\sqrt{\sigma^*} - \sqrt{\sigma_0}}{1 + 2\sqrt{\sigma_0\sigma^*} - 0.5\sigma_0 - \sigma^*} \right] = 2.$$

Интерференция, или фокусировка боковых волн разгрузки на границе контакта, приводит к остановке проникания частицы в преграду, а внутри сжатого материала создает каналные области высоких растягивающих напряжений вдоль оси конуса сжимаемости как в частице, так и в преграде. Глубина проникания каналов повреждаемости для брускообразной двумерной частицы рассчитывается из предположения, что радиальная составляющая скорости растяжения в носике продольного канала превышает критическую величину u_k , соответствующую динамическому пределу прочности материала P_k , $U_k = \frac{P_k}{P_0 c_0}$ для макротрещины и динамическому пределу упругости Гюгонио для микротрещины. Из рис. 2 видно, что глубина проникания каналов повреждаемости при постоянной скорости удара определяется ориентацией боковых граней частицы относительно лицевой поверхности преграды. Продольная повреждаемость отсутствует, когда угол наклона боковой грани превышает угол конуса сжимаемости.

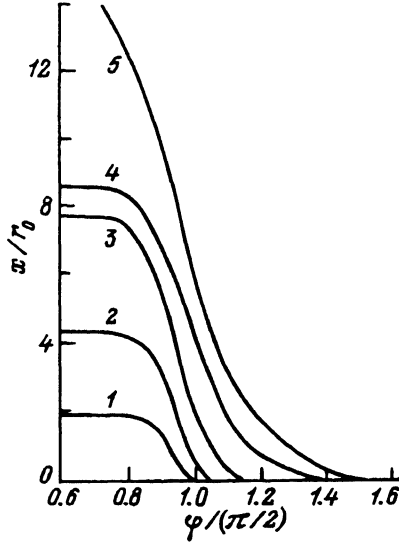


Рис. 2. Глубина проникания продольных микротрещин в зависимости от угла наклона боковых граней.

M_0 : 1 — 0.05, 2 — 0.1, 3 — 0.2, 4 — 0.3, 5 — 0.5.

Неучет геометрического фактора, играющего определяющую роль при импульсном нагружении, является одной из причин, почему не удается установить однозначной связи между режимом обработки поверхности при эрозии под ударами частиц и формами ее повреждаемости.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость толщины упроченного слоя и изменение глубины проникания микро- и макротрещин от числа Маха для брускообразной частицы с прямоугольным профилем сечения ($\varphi_0 = 90^\circ$). Приведенная на рисунке толщина упроченного слоя x^* , т.е. глубина, на которой ударная волна перерождается в упругую, не зависит от геометрии частицы и определяется скоростью удара частицы.

Затухание ударной волны и неспособность ее затормозить набегающий поток приводит к разгону, ускорению потока и как следствие возникновению новой ударной волны. Граница раздела приобретает новый импульс. Проникновение длиномерной частицы в преграду имеет периодический характер.

Из рисунка видно, что возникновение продольной канальной повреждаемости характеризуется критической скоростью соударения, когда макро- и микротрещины возникают при однократном нагружении. Критические скорости удара зависят от геометрии частицы. При более низких скоростях удара формирование продольной повреждаемости требует многократности нагружения зоны контакта и является результатом циклической усталости.

Динамическая усталость в отличие от квазистатической характеризуется строгой локализацией трещин, возникновение которых определяется геометрическим фактором расположения боковых граней частицы. Малый характерный размер импульса по сравнению с образцом, на который он действует, определяет область влияния импульса. Дефекты, статистически размещенные на поверхности и являющиеся источником повреждаемости при циклических нагрузках, в условиях импульсного нагружения оказываются "безработными". Накопление же повреждаемости в

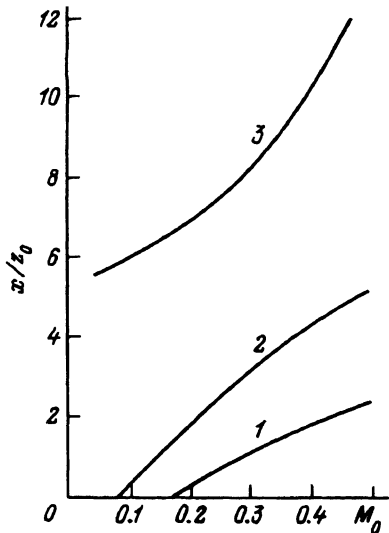


Рис. 3. Продольная повреждаемость и зона упрочнения для брускообразной частицы с прямоугольным сечением.

1 — макротрещина, 2 — микротрещина, 3 — толщина упрочненного слоя.

зоне интерференции боковых волн разгрузки происходит, как и при обычном квазистатическом нагружении. Деформация материала ε зависит от упругопластического гистерезиса ζ и числа нагружений $N\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \zeta N)$. Начальная ε_0 и критическая деформация, по достижению которой образуется макротрещина, в условиях импульсного нагружения однозначно связан с массовой скоростью $\varepsilon_0 = v/c_0$, $\varepsilon_n = u_k/c_0$. Число циклов N , определяющих стойкость материала к образованию канальной макротрещины, определяется выражением

$$N = \frac{1}{\zeta} \left(\frac{u_k}{v} - 1 \right).$$

Эффект образования продольных канальных микро- и макротрещин под кратером как результат проявления сжимаемости твердого тела — явление общее, сопровождается и другие виды импульсных нагрузок. В работе [9] возникновение канальных отколов названо эффектом “ужаления”. Эффект наблюдался ранее при импульсной лазерной обработке [10], взрыве заряда взрывчатого вещества, контактирующего с поверхностью [11], или ударе водяной струи [12], но не был объяснен. Обнаружение пор, пустот, локализуемых на дне впадин рельефа и распространяющихся в глубь поверхностного слоя в виде микротрещин [2], также является примером продольной повреждаемости. Правильная трактовка повреждаемости при ударе металлического диска дана в работе [13].

Воздействие потока частиц на поверхность твердого тела сопровождается двумя одновременно протекающими процессами: упрочнением поверхностного слоя и разуплотнением в виде канальных областей высоких растягивающих напряжений.

Продольная повреждаемость является причиной возникновения вокруг зоны контакта системы кольцевых волн в пластичных и кольцевых

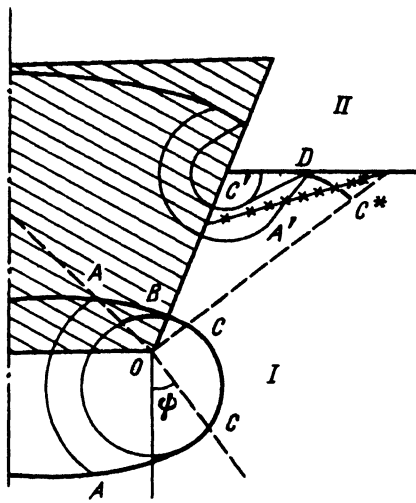


Рис. 4. Схема течения в окрестности стенки впадины.

I — начальный момент соударения — нерегулярное отражение ударной волны на стенке выступа; *AC* — искривленный участок поверхности фронта ударной волны; *AA*, *CC* — головные и хвостовые характеристики разгрузки; *II* — регулярное отражение косо ударной волны спадающего профиля с отраженной волной разгрузки; *DC** — фронт ударной волны; *DA'* и *DC'* — огибающие к головным и хвостовым характеристикам; *A'*, *C'* — точки сопряжения огибающих к головным и хвостовым характеристикам начальной волны разгрузки.

трещин в хрупких материалах. Столкновение боковых волн разгрузки сопровождается образованием отраженного импульса сжатия, перемещающегося в поперечном направлении. Выход отраженной ударной волны на периметр зоны контакта вспучивает материал рядом с зоной и является тем механизмом, который создает валик смещенного материала в пластичных материалах и кольцевые трещины в хрупких. Пульсирующий характер разгрузки сжатого материала и периодическое возникновение ударных волн в частице приводят к созданию системы волн или трещин.

Образование канальной макротрещины (при однократном или многократном нагружении поверхности частицами) меняет характер последующего ударного взаимодействия с частицами, так как канальный макротрещина сам становится внутренней свободной поверхностью, новым источником волн разгрузки. Вокруг канальной трещины генерируются кольцевые трещины второго поколения на полурасстоянии между ближайшими свободными поверхностями. Глубина их проникания сокращается вдвое. Такая конструкция, состоящая из канальной макротрещины, окруженной кольцевыми трещинами, названа множественным продольным отколом. Каждое новое *i*-поколение кольцевых трещин будет возникать после перерождения предыдущего поколения в макротрещину, и глубина их проникания будет сокращаться вдвое $x_i = x_0 (1/2)^{i-1}$, x_0 — глубина проникания канального макротрещины, сформированного боковыми волнами разгрузки.

Следует обратить внимание, что множественный продольный откол является результатом динамического расклинивания трещины при циклическом нагружении. Импульсное расклинивание принципиально от-

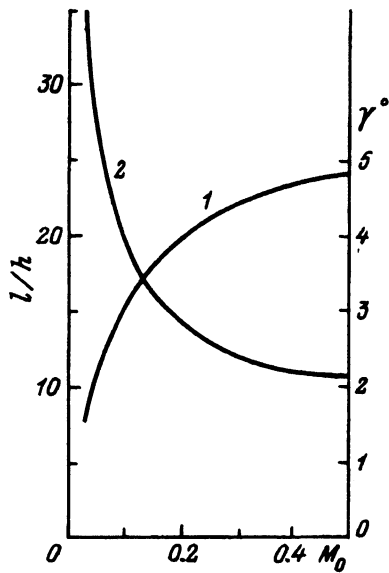


Рис. 5. Зависимость параметров лицевого откола.

1 — угол наклона поперечной зоны к поверхности преграды γ^0 , 2 — отношение ширины откольной пластины к ее толщине l/h от числа Маха.

личается от квазистатического. Материал, сопротивляясь нагружению потоком частиц, создает канальную трещину, в результате чего последующее нагружение смещает повреждаемость ближе к поверхности образца. Глубина же магистральной канальной трещины остается неизменной в процессе образования вокруг нее кольцевых трещин. В условиях периодических квазистатических нагрузок, характерный размер которых превышает размер образца, глубина трещины возрастает, поскольку информация о нагружении поступает на конец трещины. Фрагментация материала из зоны формирования множественного продольного откола создает на поверхности преграды впадину-воронку. Рельеф поверхности при этом становится шероховатым с характерным чередованием выступов и впадин.

Углубление впадин происходит до тех пор, пока угол наклона боковой стенки выступа превышает угол конуса сжимаемости. При меньшей ориентации стенок впадины импульс сжатия при ударе частицы в дно впадины приобретает способность проходить в преграду через стенку. Выход прошедшего импульса на поверхность преграды сопровождается интерференцией волн разгрузки, источником которых являются стенка впадины и лицевая поверхность. В результате в вершине выступа рельефа возникает поперечная зона высоких растягивающих напряжений [14]. Схема образования лицевого откола приведена на рис. 4, а результат расчета по этой схеме течения — на рис. 5. Угол наклона поперечного откольного сечения γ^0 к лицевой поверхности мал, не превышает 5° , а ширина откольной зоны более чем на порядок превышает ее толщину. Хлопьевидность продуктов эрозионного изнашивания на стационарной стадии эрозии — факт, хорошо известный экспериментально [15].

Критическая скорость удара превышение которой приводит к отслоению верхушки выступа в процессе однократного нагружения, зависит от геометрии впадины и для впадин с прямоугольным сечением равна $M_k = \frac{16}{n+1} \sigma_k$.

При меньших скоростях удара формирование поперечной макротрещины требует множественности нагружения и определяется динамической усталостью.

Процесс эрозионного изнашивания поверхности в каждом ее участке является процессом периодическим и включает несколько откольных механизмов повреждаемости поверхностного слоя, поочередно работающих в зоне контакта. Канальный и продольный множественные отколы осуществляют функцию формирования впадин рельефа, по которым инородный материал внедряется в преграду. Потеря материала происходит в основном через лицевой откол, локализуемый в вершинах выступа рельефа. После отслоения откольной пластины геометрия впадины нарушается и механизм генерации поперечного откола отключается.

Список литературы

- [1] Эдлер Ф. // Эрозия / Под ред. К.Прис. М.: Мир, 1982. С. 140–200.
- [2] Brown R., Kosco S., Jun E.J. // Wear. 1983. Vol. 88. P. 181–193.
- [3] Рафф А.У., Видертортн С.М. // Эрозия / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. С. 80–139.
- [4] Спринджер Дж.С. Эрозия при воздействии капель жидкости. М.: Машиностроение, 1981. 200 с.
- [5] Finnie I. // Wear. 1960. Vol. 3. P. 87–103.
- [6] Полежаев Ю.В. // ИФЖ. 1979. Т. 37. № 3. С. 389–394.
- [7] Гриб А.А., Рябин А.Г., Христианович С.А. // Прикладная математика и механика. 1956. № 4. С. 532–544.
- [8] Буравова С.Н. // Физика горения и взрыва. 1985. № 5. С. 126–131.
- [9] Буравова С.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 17. С. 63–67.
- [10] Клэр А.А., Холбрук Дж.Х., Фейрен Б.П. // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. М.: Металлургия, 1984. С. 241–269.
- [11] Бушман А.В., Канель Г.И., Ни А.А., Фортнев В.Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. Черногловка, 1988. 200 с.
- [12] Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. М.: Машиностроение, 1968. 547 с.
- [13] Беляков Л.В., Златин Н.А. ЖТФ. 1966. Т. 30. Вып. 4. С. 358–364.
- [14] Буравова С.Н. Письма в ЖТФ. 1990. Т. 19. Вып. 1. С. 24–28.
- [15] Levy A. // Wear. 1986. Vol. 108. P. 1–21.

Институт структурной
макрокинетики
Черноголовка
Московская область

Поступило в Редакцию
27 августа 1991 г.

В окончательной редакции
4 декабря 1991 г.