

05.1; 12

## ЭФФЕКТ ФОКУСИРОВКИ ВОЛН РАЗГРУЗКИ И ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ПРЕГРАДЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ЧАСТИЦ

С.Н. Б у р а в о в а

Удар частицы при эрозионном износе поверхности твердого тела сопровождается образованием под зоной контакта субтрещины, расширяющейся в глубь преграды. Причина возникновения таких продольных каналов нарушения сплошности – интерференция или фокусировка волн разгрузки, источником которых являются боковые грани частицы. Увеличение концентрации частиц, одновременно взаимодействующих с поверхностью, приводит к образованию единой коллективной ударной волны и к увеличению глубины проникновения продольных каналов.

Исследование механизма эрозионного износа при ударном воздействии абразивных частиц или капель дождя начали развиваться в связи с практическими нуждами защиты обшивок летательных аппаратов, лопаток газовых турбин. Несмотря на усилie исследователей, центральный вопрос проблемы эрозии – отклик, реакция материала на удар частицы или множества частиц, остается не ясным. Не удается установить однозначной связи между формами повреждаемости и режимом ее обработки [1]. В последнее десятилетие интенсивно развивается материаловедческий аспект исследования эрозии, накоплен фактический материал, требующий обобщения, имеются экспериментальные факты, не нашедшие объяснений с позиций общепринятых представлений. Это в первую очередь относится к возникновению пор, пустот на дне впадины рельефа поверхности после обработки ее потоком частиц. Внутрь преграды такие поры продолжают в виде субтрещин [2]. Автор не связывает образование таких мест нарушения сплошности с внедрением частиц в поверхностный слой преграды, что характерно для эрозионного износа, т.к. в исследованном режиме обработки частицы не разрушались при ударе. В модельных эрозионных экспериментах с водными струями повреждаемость преграды в виде пор превращается в воронки, размещающиеся на дне кратера [3]. Авторы отмечают что природа их образования не ясна. Изучение структуры подповерхностного слоя после обработки материала потоком частиц, разогнанных с помощью кумулятивного заряда взрывчатых веществ, обнаружило по всей глубине образца, в 100–1000 раз превышающей размер частиц, формообразования, напоминающие неплотно закрытые трещины [4]. Сделана попытка объяснить это явление, названное эффектом „сверхглубокого проникновения частиц“ [5]. По мнению автора продольные каналы являются следами траекторий частиц. Аномально низкое сопротивление твердого тела внедрению частицы обязано высокой скорости

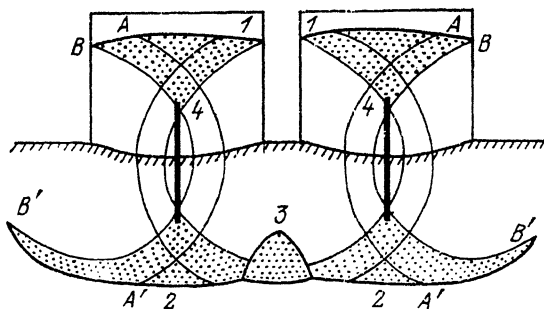


Рис. 1. Схема одновременного взаимодействия двух частиц с преградой, 1, 2 – ударные волны в частице и преграде, AA', BB – головные и хвостовые характеристики волн разгрузки, 3 – область сжатия, возникающая при соударении соседних импульсов, 4 – продольный канал нарушения сплошности.

деформации материала, который ведет себя как упругохрупкая среда, т.к. пластические свойства не успевают проявиться. Поэтому перед движущейся частицей раскрывается трещина нормального отрыва, а после прохождения она схлопывается, при этом сама частица при движении внутри твердого тела не претерпевает разрушения. Согласно [6], частичка при своем перемещении в твердом теле приводит к разупрочнению среды за счет локального нагрева прилегающих слоев до температур, близких к температуре плавления. Образующийся за частичкой канал схлопывается, а возникающая кумулятивная струя толкает частичку. Все перечисленные примеры характеризуются импульсным характером нагружения преграды, когда сам объект нагружающий имеет ограниченные и малые размеры. Высокоскоростному деформированию материала сопутствуют волновые явления. Известно, что действие заряда взрывчатого вещества, контактирующего с поверхностью мишени [7], или метание тонкого диска [8] приводят к специфической форме повреждаемости твердого тела в виде образования трещин под зоной приложения разгрузки, ориентированных приблизительно параллельно оси симметрии ударника. Причиной образования таких продольных каналов нарушения сплошности является интерференция волн разгрузки. Эффект фокусировки или взаимодействия волн разгрузки, создающий в преграде продольные каналы нарушения сплошности, является одной из причин повреждаемости преграды, при эрозионном износе, когда нагружающий объект становится микрометрических размеров.

Решение сопряженной задачи взаимодействия частицы с преградой позволяет количественно оценить глубину проникновения таких канальных формообразований.

Удар частицы сопровождается сжимаемостью материалов, которое проявляется в образовании импульсов сжатия в частице и преграде (см. рис.1). Выход импульса сжатия на свободную боковую поверхность частицы приводит к возникновению волны разгрузки, которая искривляет и ослабляет фронт ударной волны. Уравнение ис-

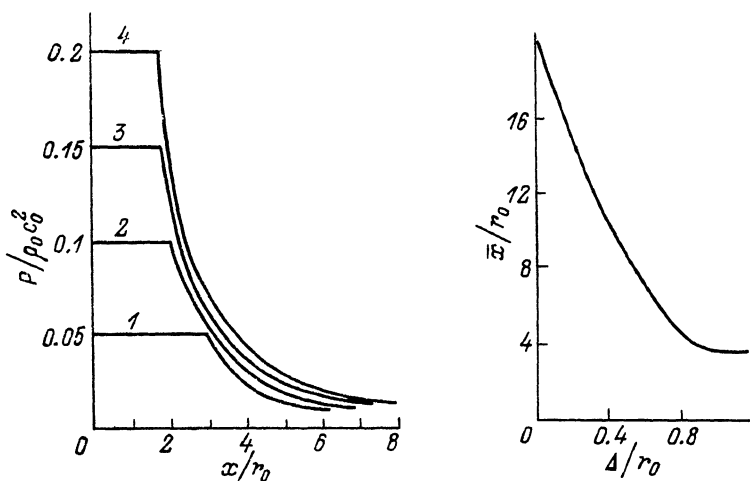


Рис. 2. Зависимость абсолютной величины максимальных растягивающих напряжений в продольных каналах от глубины проникновения для различных чисел Маха (отношение скорости удара к скорости звука: 1 -  $M_0 = 0.1$ , 2 -  $M_0 = 0.2$ , 3 -  $M_0 = 0.3$ , 4 -  $M_0 = 0.4$ ).

Рис. 3. Глубина проникновения продольных каналов в глубь преграды от полурасстояния между соседними частицами, одновременно взаимодействующими с преградой для  $M_0 = 0.2$ .

кривленного фронта в координатах  $\frac{x}{r_0} (1 + \chi) \tau$  и  $\frac{y}{r_0} = 1 - \chi \tau$  имеет вид [6]:

$$\chi = \frac{b_0}{4} + \frac{\sqrt{b_0}}{2} y - \frac{1}{4} y^2,$$

где  $\tau = \frac{c_0 t}{r_0}$  - безразмерное время,  $b_0 = \frac{c_{H0} + c_{H0} - c_0}{c_0}$  - малый параметр,  $r_0$  - радиус частицы,  $c_{H0}$ ,  $c_{H0}$ ,  $c_0$  - массовая скорость, скорость звука непосредственно за фронтом ударной волны в начальный момент времени и скорость звука невозмущенного материала. Каждое состояние на фронте ударной волны, характеризуемое параметром  $b$ , через который выражаются все величины потока, перемещается по прямолинейным траекториям, угол наклона которых определяется из выражения  $\operatorname{tg} \psi = \frac{1 + \chi}{y}$ . Это решение справедливо до момента встречи волн разгрузки, берущих начало на разных боковых гранях частицы. Интерференция встречных волн разгрузки [9] или фокусировка их в центральных областях приводит к возникновению канальной области высоких растягивающих напряжений, которые релаксируют с образованием продольной трещины, когда величина напряжений превосходит откольную прочность материала (рис. 2). Распространение таких трещин в глубь преграды будет

иметь место до тех пор, пока давление в импульсе превышает абсолютное значение динамического предела прочности. При одновременном воздействии на преграду потока частиц индивидуальные импульсы могут перекрываться, образуя коллективную волну. Затухание такой волны протекает существенно медленнее [10], поэтому глубина проникновения продольных каналов будет выше, чем в случае удара одной частицы, и будет зависеть от расстояния между соседними частицами  $2\Delta$  (см. рис. 3). Расчеты столкновения импульса сжатия [9] и затухания фронта коллективной ударной волны в одномерном приближении [10] выполнены численно.

Таким образом, причиной повреждаемости преграды под действием частиц, проявляющейся в образовании продольных каналов нарушения сплошности под зоной контакта, так же как при импульсном нагружении преграды макрообъектами, являются откольные явления, обязанные интерференции или фокусировке волн загрузки, источником которых являются боковые грани частицы. Откол — специфическая форма разрушения при высокоскоростном деформировании, он локализуется строго в определенных местах, в то время как при квазистатическом деформировании разрушение имеет место на концентраторах, статически распределенных по поверхности. Эффект „ужаливания“ поверхности при ударе в процессе эрозионного износа в литературе не описан, т.к. расчеты взаимодействия частиц с преградой, как правило, основываются на квазистатической механике разрушения.

Что же касается эффекта „сверхглубокого проникания“, то он является частным случаем эрозионной повреждаемости под действием потока частиц. Наблюдаемые каналы не являются траекториями частиц, это результат действия эффекта фокусировки волн загрузки. „Сверхглубина“ проникновения продольных каналов нарушения сплошности обязана как высокой плотности частиц, так и действию дополнительных ударников в виде облицовки кумулятивной выемки и разрушаемого экрана, осколки которых превосходят частицу по размеру и создают коллективную ударную волну, распространяющуюся на большую глубину, чем могут создать одни частицы.

Теория эрозионного износа под действием потока частиц требует изменения подхода и учета специфики высокоскоростного деформирования.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Эрозия / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982.
- [2] Brown R. // Wear. 1983. V. 88. N 2. P. 181.
- [3] Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. М., 1968. 542 с.
- [4] Козорезов К.И., Максименко В.Н., Ушренко С.М. Избранные вопросы современной механики. М.: МГУ. 1981, т. 1.
- [5] Черный Г.Г. // ДАН СССР. 1987. Т. 292. № 6. С. 1324.

- [6] Гриб А.А., Рябинин А.Г., Христианович С.А. // ПММ. 1956. № 4. С. 532.
- [7] Альтшулер Л.В., Андилевко С.К., Романов Г.С., Ушеренко С.М. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 5. 1989.
- [8] Райнхарт Дж.С., Пирсон Дж. Поведение металлов при импульсивных нагрузках. М.: ИЛ, 1958. 296 с.
- [9] Беляков Л.В., Златин Н.А. // ЖТФ. 1966. Т. 36, В. 2. С. 358-364.
- [10] Курант Г., Фридрихс К.Ф. Сверхзвуковое течение и ударные волны. М.: ИЛ, 1950. 426 с.
- [11] F o w l e s G.R. // J. Appl. Phys. 1960. V. 31. P. 655.

Институт структурной  
макрокинетики АН СССР

Поступило в Редакцию  
10 февраля 1989 г.  
В окончательной редакции  
24 мая 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 17

12 сентября 1989 г.

Об.3

ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ  
ЗЕЛЕННЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ  
С КЕРАМИЧЕСКИМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

М.Я. Рахлин, В.Е. Родионов,  
В. Бойко

Важной задачей на пути создания много- и полноцветных тонкопленочных электролюминесцентных экранов является решение вопроса повышения надежности и стабильности работы монохроматических электролюминесцентных элементов зеленого, красного, голубого или синего цвета свечения [1]. Одним из путей решения этой задачи является создание электролюминесцентных структур с керамическим диэлектриком [2]. Малые рабочие напряжения, высокие значения пробивных напряжений, свойственные таким структурам, делают их весьма перспективными для широкого использования в индикаторной технике.

В настоящей работе приведены результаты по исследованию тонкопленочных электролюминесцентных излучателей (ТПЭЛИ) с керамическим диэлектриком зеленого цвета свечения со структурой МДЦМ-типа и обычных ТПЭЛИ со структурой МДЦМ-типа. У излучателей обоих типов активным слоем являлся тонкий слой сульфида цинка ( $ZnS$ ), легированный тербием ( $TbF_3$ , 5 вес. %), толщиной 0,6 мкм. В качестве диэлектрических слоев в МДЦМ-структуре использовались слои окиси иттрия, а в МДЦМ структуре -