

- [2] S e t h i a n J.D., R o b s o n A.E., G e r b e r K.A., D e S i l v a A.W. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59. N 8. P. 892-895.
- [3] Мейерович Б.Э., Сухорукоев С.Т. Препринт ИТЭФ № 129-89. М.: ЦНИИ атоминформ, 1989. 12 с.
- [4] Фортеев В.Е., Якубоев И.Т. Физика неидеальной плазмы. Чернооголовка: ОИХФ АН СССР, 1984. С. 263.
- [5] I s h i m a r u S. // Rev. Mod. Phys. 1982. V. 54. N 4. P. 1017-1059.

Институт высоких температур  
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию  
5 апреля 1990 г.  
В окончательной редакции  
с 15 июля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 19 12 октября 1990 г.

05.1; 11

© 1990

## ЭРОЗИОННАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОТОКА ЧАСТИЦ

С.Н. Б у р а в о в а

Из эксперимента известно, что образование поперечной трещины в преграде под действием потока частиц на стационарной стадии износа приводит к уносу материала с поверхности в виде тонких хлопьевидных пластинок. Поперечные области разуплотнения, или трещины генерируются в результате ударного воздействия частицы на заглубленные участки поверхностного рельефа. В этом случае возникающий импульс сжатия ориентирован под малым углом к поверхности выступа. Интерференция его с отраженной волной разгрузки при выходе на торцевую поверхность сопровождается образованием поперечной области разуплотнения или нарушения сплошности.

Изучением эрозионного износа интенсивно занимаются во всем мире [1]. Многочисленные попытки найти связь интенсивности уноса материала с каким-либо параметром теории упругости или пластичности не увенчались успехом. Скорость потери вещества для металлов с различной тепловой обработкой, несмотря на большое изменение твердости, отличается мало [2]. Эрозия слабо коррелирует с пластичностью, практически не зависит от трещиностойкости, ударной вязкости, прочности на разрыв [3]. Металлургические изменения, такие как размер, форма зерна, состав фаз оказывают более существенное влияние на сопротивляемость эрозии, чем твер-

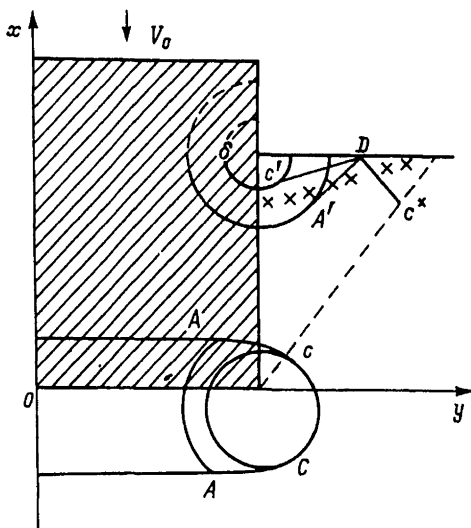


Рис. 1. Схема течения в окрестности уступа.

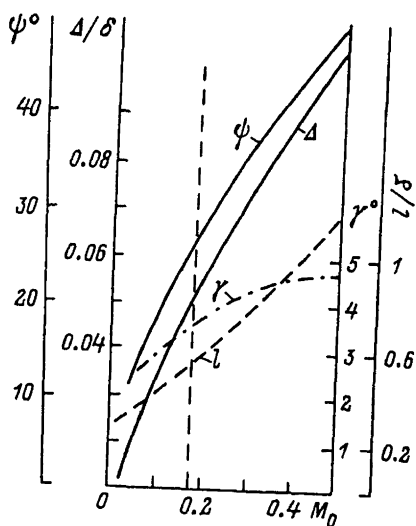
1 - начальный момент соударения - нерегулярное отражение ударной волны на границе раздела частица-уступ, AC - искривленный участок фронта ударной волны, AA, CC - головная и хвостовая характеристика центрированной волны разгрузки, П - регулярное отражение при выходе импульса сжатия на торцевую поверхность уступа, DC<sup>x</sup> - фронт ударной волны, A'D и C'D - огибающие к головным и хвостовым характеристикам, A' и C' - точки сопряжения огибающих с характеристиками волны разгрузки, возникшей в момент выхода импульса. Крестиками отмечено положение откольной поперечной трещины.

дость [4]. Материаловедческие исследования [2-5] показали, что на начальном этапе износа формируется волнистый рельеф поверхности, продуктами износа являются частички мелкой фракции. Стационарная стадия характеризуется генерацией поперечных трещин, приводящих к отделению кусочков металла в виде хлопьевидных пластин, относительно крупных размеров. Накопленный обширный материал требует обобщения и построения модели, способной предсказать поведение материала в условиях эксплуатации. Для объяснения природы эрозивного износа предложено множество моделей. В основном это полуэмпирические, использующие обычную механику разрушения и содержащие несколько подгоночных параметров, определяемых из экспери-

мента. Статистическая модель дождевой эрозии основана на предположении о сверхскоростном растекании капли при ударе. Столкновение скоростной струи с неоднородностями рельефа вызывает образование трещины [6]. Причиной поперечной трещины может быть усталостный характер разрушения [7] или туннельное проникание жидкости в глубь мишени [1]. Много моделей основано на аналогии с другими физическими процессами. Взаимодействие частицы с преградой автор [8] рассматривает как резание микрорезцом, материал в виде стружки удаляется с поверхности. По аналогии с циклическим нагревом [9] вводится понятие эффективной энтальпии эрозионного разрушения, которая является линейной функцией общей потери массы. Строятся функции зародышеобразования и рост кратера, когда пытаются описать эрозию процессом конденсации [1]. Однако ни одна из моделей не прогнозирует появление поперечной трещины, основной причины уноса материала. Согласно экструзионного механизма эрозии [2, 4, 5] твердый поверхностный слой, упрочненный действием потока частиц, выдавливает более мягкий материал на поверхность, который затем расплющивается в хлопьевидные пластины под ударами частиц. Основное положение, на котором базируется механизм обратной экструзии, а именно создание сжимающих усилий под упрочненным слоем, не выдерживает критики. Действительно, высокоскоростное деформирование основы при ударе частиц, сопровождается образованием импульса сжатия. Упрочнение происходит благодаря пластическому деформированию в волне сжатия, затухание импульса определяет толщину слоя. По мере затухания импульса прекращается деформирование и, следовательно, упрочнение. Затухание импульсного воздействия в преграде от действия потока частиц наблюдается при детонационном напылении [10].

Для установления причины образования поперечной трещины и влияния на нее различных режимов обработки проведен расчет соударения частицы в заглубленный участок рельефа поверхности. Задача решается методом характеристики с использованием малого параметра в двумерной постановке. Частица рассматривается бруском прямоугольного сечения с основанием  $2r_0$ , поверхность - полуплоскость с уступом высотой  $\delta$ . При ударе частица плотно соприкасается с боковой гранью уступа. Материалы частицы и преграды одинаковы. Возникающий при ударе частицы импульс представляет собой комплекс ударной волны и центрированной волны разгрузки, источником которой в начальный момент является периметр зоны контакта. Волна разгрузки искривляет фронт, ослабляет его, поток вещества, следующий за фронтом, полностью тормозится, а длительность воздействия импульса сокращается (см. рис. 1). Каждое состояние на фронте перемещается в пространстве по своим прямолинейным траекториям [11]. Импульс сжатия, вошедшей в уступ, имеет убывающую интенсивность и длительность с максимальными значениями на боковых гранях. Нулевая интенсивность и длительность определяют предельный угол конуса  $\psi_{пред}$ , в котором распространяется импульс сжатия. Максимально возможное давление на боковой грани равно четвертой части начального, если грань

Рис. 2. Изменение предельного угла конуса, в котором распространяется импульс сжатия  $\psi_{пред}$ , максимальной глубины залегания  $\Delta$ , угла наклона  $\gamma$  поперечной трещины, размера зоны влияния  $l$  от числа Маха, вертикальный пунктир соответствует критической скорости удара.



вертикальна ( $\psi = 0$ ). По мере отклонения грани от вертикали давление вместе с длительностью входящего в уступ импульса падает. Если ориентация боковой грани превысит  $\psi_{пред}$ , удар частицы не будет оказывать какого-либо влияния на микровыступ.

Выход ударной волны на торцевую поверхность сопровождается образованием отраженной волны разгрузки, которая сообщает потоку дополнительную скорость, равную массовой скорости за ударной волной. Взаимодействие двух встречных волн разгрузки приводит к появлению поперечной области разуплотнения. Если растягивающие напряжения превышают динамический предел прочности, произойдет образование откольной трещины в процессе однократного соударения. В противном случае для образования разрыва требуются множественные удары. Критическая скорость удара, разделяющая режимы образования откольной трещины на одно- и многоразовые определяется, если известен динамический предел прочности  $P_*$ ,  $M_0^* = 8P_*/\rho_0 c_0^2$ . Здесь  $M_0^*$  - число Маха, равное отношению скорости удара к скорости звука  $c_0$ ,  $\rho_0$  - начальная плотность. Область разуплотнения возникает под поверхностью, максимальная глубина залегания  $\Delta$  локализуется на боковой грани там, где впервые сталкиваются хвостовые характеристики встречных волн разгрузки. Ширина поперечной области разуплотнения определяется зоной влияния  $l = \Delta \tan \psi_{пред}$ , а угол наклона  $\gamma$  к поверхности  $\tan \gamma = \Delta/l$  (см. рис. 2).

Таким образом, с позиций высокоскоростного деформирования поперечная трещина в основе под действием потока частиц, генерируется в вершинах уступа или микровыступа, когда частица взаимодействует с заниженным участком рельефа поверхности. Причина образования поперечной повреждаемости - откольные явления, обусловленные интерференцией импульса сжатия с отраженной волной разгрузки. Необходимым условием появления таких трещин, а следовательно начала стационарной стадии эрозии - определенная ориентация боковых граней микровыступов рельефа относительно направления удара. Имеется предельный угол отклонения боковых граней, зависящий от скорости удара, когда частица не оказывает влияние на микровыступ.

- [1] Эрозия. / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. 464 с.
- [2] C o u s e n s A.K., H u t c h i n g s I.M. // Wear. 1983. V. 88. P. 335-348.
- [3] N a i m M., B a g a d u r S. // Wear. 1986. V. 112. P. 217-234.
- [4] L e v y A.V. // Wear. 1986. V. 108. P. 1-41.
- [5] B r o w n R. // Wear. 1983. V. 88. P. 181-193.
- [6] E n g e l O.G. // J. Appl. Phys. 1973. V. 44. P. 692-704.
- [7] С п р и н ж е р Дж.С. Эрозия при воздействии капель жидкости. Л.: Машиностроение, 1981. 200 с.
- [8] F i n n i l I. // Am. Soc. Mech. Engeneers, IV, X, 1958, p. 527-532.
- [9] П о л е ж а е в Ю.В. // Инженерно-физический журнал. 1979. Т. 37. № 3. С. 389-394.
- [10] Б а р т е н ь е в С.С., Ф е д ь к о Ю.П., Г р и г о р о в А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. С. 216.
- [11] Г р и б А.А., Р я б и н и н А.Г., Х р и с т и а н о в и ч С.А. // Прикладная математика и механика, 1956. Т. 20. № 2. С. 532-536.

Институт структурной  
макрокинетики АН СССР

Поступило в Редакцию  
16 декабря 1989 г.  
В окончательной редакции  
6 октября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 19

12 октября 1990 г.

07; 12

© 1990

ИНДУЦИРОВАННАЯ ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННЫМ СВЕТОМ  
ГИРОТРОПИЯ (ФОТОГИРОТРОПИЯ)  
В ПРОТРАВНЫХ АЗОКРАСИТЕЛЯХ

Ш.Д. К а к и ч а ш в и л и

В 1919 г. Ф. Вейгерт открыл явление фотоанизотропии, когда под воздействием линейно поляризованного актиничного света в первоначально изотропной среде возникает анизотропия [1]. В 1928 г. аналогичное явление возникновения гиротропии под воздействием циркулярно поляризованного актиничного света (фотогиротропия) было обнаружено Зохером и Копером в системах галогенидов серебра в желатиновой матрице [2]. В дальнейшем эксперименты по фотогиротропии не были воспроизведены.