

03;05.1;11

## ПРИРОДА РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ

© С.Н.Буравова

Кавитация является причиной разрушения многих объектов — это гребные винты, подводные крылья судов, турбины и т.д. Интенсивные исследования проблемы эрозии [1,2] не привели к пониманию процессов повреждаемости поверхностного слоя, не объяснены основные экспериментальные факты, такие как: образование глубоких раковин на дне язвенных очагов разрушения [3], формирование поперечных трещин под кромками впадин рельефа [4]. Эти трещины являются основной причиной потери материала на стационарной стадии изнашивания поверхности. Считается, что мелкие вмятины возникают от удара кумулятивных струй при схлапывании несимметричных кавитационных пузырьков [1]. Язвенные очаги связывают с воздействием ударной волны, которая формируется при одновременном схлапывании коллектива пузырьков. Следует заметить, что аналогичные виды повреждаемости поверхности наблюдаются при ударе жидких капель [5], твердых частиц [6], детонационном напылении [7], импульсном лазерном облучении [8], при воздействии ударника ограниченных размеров на преграду [9]. Сходный характер повреждаемости поверхности при различных типах импульсного нагружения свидетельствует об общем механизме разрушения. Как показано в работах [10,11], повреждаемость при динамическом воздействии имеет отклонную природу и является результатом интерференции волн разгрузки, сопровождающих импульс сжатия.

Кавитационное воздействие рассматривается как импульсное нагружение поверхности сферическими ударными волнами, исходящими из зоны кавитации. При таком взаимодействии в твердом теле возникает импульс сжатия, а в жидкости — отраженная ударная волна. При этом скорость границы контакта изменяется от бесконечно большой величины в момент удара до скорости звука в жидкости  $C_1$ . Отраженная ударная волна всегда “привязана” к границе контактной поверхности. В твердом теле ударная волна сопровождает границу до момента, когда скорость последней становится меньше скорости звука материала преграды  $C_0$ . Отделение ударной волны в твердом теле сопровождается

возникновением волны разгрузки. Источником первой волны разгрузки является пространство, куда входит импульс сжатия. Фокусировка волны разгрузки создает в центре области сжатия продольную канальную зону высоких растягивающих напряжений. В расчетах предполагалось, что отрицательное давление в зоне фокусировки равно по величине начальному давлению  $P_0$ , как и в случае одномерной интерференции волн разгрузки. Интенсивность импульса сжатия в преграде в условиях кавитационного нагружения составляет 500–1000 МПа [1,2], что ниже динамического предела упругости Гюгонио многих металлов. Поэтому разрушение в зоне взаимодействия волн разгрузки возникает в результате накопления деформационных изменений при многократных нагрузках.

Если упругопластический гистерезис материала  $\zeta$  известен, то число циклов ударных воздействий  $N_0$ , характеризующих инкубационный период зарождения канальной продольной трещины, может быть определен:  $N_0 = (P^*/P_0 - 1)/\zeta$ . Здесь  $P^*$  — откольная прочность материала. Рост глубины канальной трещины  $L$  в зависимости от числа циклов описывается выражением

$$L = r_0 \operatorname{tg} \cos^{-1} [P^*/P_0(1 + \zeta N)],$$

где  $r_0$  — радиус границы контактной поверхности в момент отделения ударной волны. Как только трещина начала расти в глубь материала, она сама становится внутренним источником волны разгрузки. В результате вокруг канальной трещины возникают кольцевые зоны растягивающих напряжений. При этом углубление канальной трещины может происходить только за время инкубационного периода зарождения кольцевой трещины первого поколения. Максимальная глубина канальной откольной трещины  $L_0$  будет иметь место при  $N = 2N_0$  (без учета упрочнения поверхностного слоя). Специфической особенностью формирования повреждаемости под зоной контакта, которая является следствием импульсного характера нагрузки, является образование кольцевых трещин. При этом углубление трещины  $i$ -го поколения будет иметь место во время инкубационного периода зарождения трещины последующего поколения, после чего рост трещины прекратится. Максимальная глубина кольцевой трещины  $i$ -го поколения зависит от координаты расположения трещины  $r_i$  и координаты близлежащего источника волны разгрузки  $r'$ :  $L_i = (r' - r_i)L_0/r_0$ . Координата кольцевой трещины  $r_i$  зависит от положения ближайших трещин  $r'$  и  $r''$ :

$$r_i/r_0 = (r' + r'')/2r_0 + (r'' - r')/2.$$

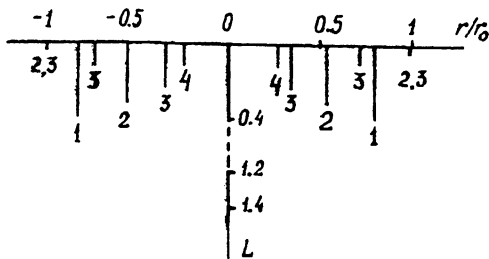


Схема расположения продольных кольцевых трещин под зоной контакта: 1, 2, 3 — номера поколений кольцевых трещин.

Здесь  $\tau = C_0 t / \eta_0$  — безразмерное время прохождения сферической ударной волны через координату  $r$ :

$$\tau = \left[ (r^2/r_0^2 + C_0^2/C_1^2 - 1)^{1/2} - (C_0^2/C_1^2 - 1)^{1/2} \right] C_0/C_1.$$

На рисунке приведена схема расположения кольцевых трещин под зоной контакта для случая  $\zeta = 0.001$ ,  $C_0/C_1 = 4$  и  $P^*/P_0 = 4.8$ . В силу того что при прохождении сферическими ударными волнами через кольцевую трещину волна разгрузки возникает в момент прохождения и далее следует за границей контактной поверхности, новая кольцевая трещина зарождается ближе к удаленному источнику разгрузки. Из рисунка видно, что кольцевые трещины раньше всего генерируются на более удаленных от центра участках. Каждое последующее поколение трещин имеет тенденцию приближаться к центральной канальной трещине, число их возрастает, а глубина проникания падает. Фрагментация материала из зоны образования множественных кольцевых трещин приводит к тому, что дно формируемого на поверхности язвенного очага разрушения на начальном этапе будет иметь более глубокие выемки на периферийных участках зоны контакта. При повторных циклических нагрузках выкрашивание материала приближается к канальной трещине, глубина которой сохраняет свою величину на всем протяжении формирования язвенного очага разрушения.

Таким образом, кавитационная эрозия является процессом откольного усталостного разрушения. Откольная усталостная трещина возникает в зонах интерференции волн разгрузки, поэтому место зарождения ее определяется геометрическим фактором расположения свободных поверхностей, являющихся источником волн разгрузки. Это основное отличие повреждаемости поверхности в условиях динамических нагрузок от традиционных квазистатических циклических, при которых разрушение возникает на дефектах поверхностного слоя.

Следует заметить, что физико-механические свойства материала при малых динамических нагрузках не известны, неоднородные откольные разрушения, к которым относится повреждаемость при кавитационной эрозии, не исследованы, что является основной причиной, затрудняющей развитие строгой количественной теории эрозионного изнашивания поверхности в условиях импульсного воздействия на материал.

### Список литературы

- [1] *Прис К.М.* // Эрозия/ Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. С. 269-330.
- [2] *Георгиевская Е.П.* // Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней. Л.: Судостроение, 1978. 168.
- [3] *Hanson I., Kristensen K.J., Morch K.A.* // J. Phys. D. 1978. N 11. P. 891.
- [4] *Vyas B., Preece C.M.* // J. Appl. Mech. 1976. V. 47. P. 1533.
- [5] *Рафф А. У., Видернторн С.М.* // Эрозия / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. С. 80-139.
- [6] *Brown R., Kosco S., Jun E.J.* // Wear. 1983. N 88. P. 181-193.
- [7] *Буравова С.Н., Гончаров А.А., Кисилев Ю.М., Миронов Э.А., Федько Ю.П.* // Порошковая металлургия. 1991. № 10. С. 22-27.
- [8] *Беликова А.Ф., Буравова С.Н., Гончаров А.А., Федько Ю.П.* // Поверхность. Физика, Химия, Механика. 1989. № 10. С. 134-139.
- [9] *Ададуров Г.А., Белкинова А.Ф., Буравова С.Н.* // Физика горения и взрыва. 1992. № 4. С. 95-109.
- [10] *Буравова С.Н.* // Журн. техн. физика. 1992. Т. 62. № 8. С. 58-66.
- [11] *Buravova S.* // Wear. 1992. N 157. P. 359-370.

Институт структурной  
макрокинетики РАН

Поступило в Редакцию  
8 февраля 1996 г.