

03;05

Кавитационное воздействие пузырьков на поверхность твердого тела

© С.Н. Буравова, Ю.А. Гордополов

Институт структурной макрокинетики РАН, Черноголовка, Моск. область
E-mail: svburavova@yandex.ru

Поступило в Редакцию 11 марта 2010 г.

Природа динамической повреждаемости при кавитационной эрозии — откольная, как результат интерференции волн разгрузки. Сферические ударные волны, возникающие в результате схлопывания кавитационных пузырьков, создают в преграде ударные волны. Волны разгрузки возникают, когда скорость границы контактной поверхности становится меньше скорости звука материала преграды, при этом ударные волны выходят на свободную поверхность. Координата возникновения волны разгрузки определяет будущую область повреждаемости. Интерференция волны разгрузки создает канальную откольную трещину, вокруг которой при последующем нагружении образуются коаксиальные цилиндрические трещины, которые формируются, как правило, в режиме динамической усталости.

Рассмотрение проблемы повреждаемости поверхности при кавитационном воздействии с позиции волновой механики позволяет установить откольный характер возникновения трещин. Откол — вид динамического разрушения, обусловленный интерференцией или фокусировке волн разгрузки. Волна разгрузки при действии сферической ударной волны, которая возникает при схлопывании кавитационных пузырьков, появляется в момент, когда скорость границы контактной поверхности снижается до скорости звука в преграде. Фокусировка возникшей волны разгрузки создает осевую зону высоких растягивающих напряжений, перерастающую в откольную трещину. Последующее нагружение поверхности сопровождается зарождением и прорастанием кольцевых трещин вокруг канальной трещины сначала на периферии зоны повреждаемости, затем ближе к центру. Характерной чертой кавитационного изнашивания поверхности является последовательное образование откольных трещин.

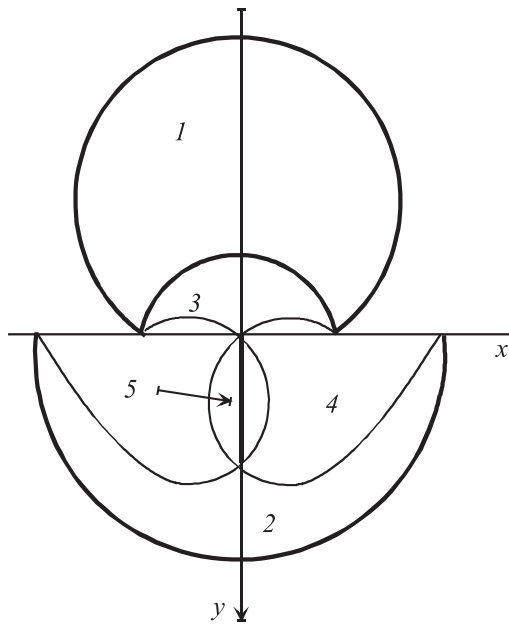
Кавитационное изнашивание поверхности проявляется в образовании глубоких раковин. Существует две точки зрения, объясняющие этот вид повреждаемости: язвенные образования обязаны действию струй, которые возникают при несимметричном схлопывании пузырька. Несимметричное схлопывание заставляет пузырек находиться на поверхности или в непосредственной близости от нее, а такая ситуация реализуется довольно редко. Многократное соударение сферических ударных волн, возникающих при схлопывании пузырьков, по мнению многих исследователей, могут приводить только к образованию неглубоких округлых лунок. Цель работы — показать, что именно сферические ударные волны ответственны за образование множественных глубоких раковин на поверхности твердого тела.

Уравнение, описывающее движение фронта сферической ударной волны и скорость перемещения границы контактной поверхности имеют вид:

$$x^2 + (y - 1)^2 = \tau^2, \quad \frac{dx}{d\tau} = \frac{\tau}{\sqrt{\tau^2 - 1}}; \quad (1)$$

здесь $\tau = c_{01}t/R_0 \geq 1$ — безразмерное время, R_0 — начальный радиус сферы в момент соприкосновения с поверхностью твердого тела, c_{01} — скорость звука в жидкости. В начальный момент $\tau = 1$, скорость границы контакта является бесконечно большой величиной и стремится к скорости звука в жидкости по мере натекания сферической волны на преграду. Ударная волна в преграде „привязана“ к точке контакта. Когда скорость границы становится ниже скорости звука, ударная волна в преграде отделяется от границы контакта. Появление свободной поверхности при этом порождает центрированную волну разгрузки. Время и координата образования волны разгрузки определяются из условия $dx/d\tau = k$, где k — отношение скоростей звука в преграде и жидкости. Фокусировка возникшей волны разгрузки создает на оси симметрии каналную зону высоких растягивающих напряжений. Рисунок поясняет возникновение каналного откола. Если напряжение растяжения превосходит откольную прочность материала, в зоне фокусировки образуется откольная трещина непосредственно в процессе удара [1]. В условиях кавитационного воздействия напряжение в зоне интерференции, как правило, ниже откольной прочности материала P_s , и откольные трещины формируются в режиме динамической усталости [2].

Глубина проникания каналной трещины L_0 определяется из условия накопления критической деформации ε_s ($\varepsilon_s = u_s/c_{02} = P_s/\rho_{02}c_{02}^2$) на



Взаимодействие сферической ударной волны с металлической преградой: 1 — сферическая область повышенного давления, возникающая после схлопывания одного или нескольких пузырьков, объединившихся в одну ударную волну; 2 — ударная волна в преграде; 3 — отраженная ударная волна в жидкости; 4 — волна разгрузки; 5 — канальная зона высоких растягивающих напряжений (откольная трещина).

кончике растущей трещины, здесь c_{02} — скорость звука в преграде, ρ_{02} — начальная плотность, u_s — массовая скорость растяжения. Деформация в откольной трещине создается радиальной составляющей скорости растяжения, которая составляет угол θ с направлением к источнику волны разгрузки (r_0):

$$\varepsilon_s = \varepsilon_0(1 + 2\xi N_0) \cos \theta, \quad \text{где} \quad \cos \theta = (2 - \varepsilon_0/\varepsilon_s)^{-1}; \quad (2)$$

здесь $\varepsilon_0 = u^*/c_{02}$ — начальная деформация, ξ — упругопластический гистерезис, u^* — массовая скорость контактной поверхности, N_0 — критическое число циклов нагружения ($\xi N_0 = \varepsilon_s/\varepsilon_0 - 1$). Интересно,

что за N_0 циклов на поверхности ($\theta = 0$) возникает разрыв, пора, которая при дальнейшем нагружении прорастает в глубь материала в виде канальной трещины. Глубина канальной трещины зависит от координаты возникновения центрированной волны разгрузки r_0 [2]:

$$L_0 = r_0 \tan \theta \quad (\text{при } \varepsilon < \varepsilon_s), \quad L_0 = r_0 \tan \arccos \varepsilon_s / \varepsilon_0 \quad (\text{при } \varepsilon_0 > \varepsilon_s). \quad (3)$$

Координата r_0 определяет зону повреждаемости, где формируется будущая раковина. Давление в ударной волне за зоной повреждаемости ($x > r_0$) существенно снижается [3] из-за взаимодействия с центрированной волной разгрузки, поэтому ударная волна оказывает слабое влияние на поверхности вне зоны повреждаемости.

Канальная трещина ($N > N_0$) при прорастании сама становится источником новой (внутренней) волны разгрузки. Интерференция внутренней (координата источника $x = 0$) и центрированной волн разгрузки (r_0) создает условия для возникновения кольцевой (цилиндрической) трещины, которая начинает экранировать влияние центрированной волны разгрузки на канальную трещину. Рост канальной трещины прекращается. Для кольцевых трещин первого поколения глубина проникания трещины равна $L_1 = x_1 \tan \theta$, x_1 — координата появления цилиндрической трещины первого поколения. Кольцевая трещина в свою очередь становится источником разгрузки и генерирует образование кольцевых трещин второго поколения и т.д. Для трещин второго поколения — $L_2 = x_2 \tan \theta$, $L_{21} = (r_0 - x_1) \tan \theta$. Глубина проникания продольных цилиндрических трещин, растущих в режиме динамической усталости, сокращается по мере уменьшения расстояния между ближайшими источниками волн разгрузки. Величина θ сохраняется постоянной для кольцевых трещин всех поколений, если интенсивность нагрузки остается неизменной.

Следует заметить, что наличие в поверхностном слое множества продольных трещин приводит к фрагментации материала в процессе нагружения и выносу осколков из зоны контакта. В результате потери материала на поверхности твердого тела образуется впадина, раковина. Глубина раковины, как правило, на порядок превышает шероховатость поверхности, возникающей в результате действия кавитационных пузырьков [4,5]. Процесс удаления фрагментированного материала из зоны контакта в настоящее время не изучен.

Представляет интерес оценить величины параметров, характеризующих начальную стадию разрушения при кавитационном изнашивании.

Параметры, характеризующие кавитационное воздействие на поверхность

P_a , МПа	100	200	400	600	800	1000
u_a , м/с	44.6	84.5	154.7	216.3	272	322.9
P^* , МПа	200	410	860	1330	1805	2285
U^* , м/с	5.1	10.2	21.4	32.9	44.5	56.4
ε_0	0.001	0.002	0.0043	0.0066	0.009	0.011
$N_0 \cdot 10^{-3}$	6.71	2.85	0.79	0.17	0	0
L_0/r_0	1.58	1.42	1.04	0.55	0.61	0.69

Давление на границе раздела находится из решения системы уравнений:

$$\frac{u^{*2}}{c_{01}^2} = \frac{P^*}{A_2} \alpha_2 \frac{1}{n_2}, \quad \frac{(2u_a - u^*)^2}{c_{01}^2} = \frac{P^*}{A_1} \alpha_1 \frac{1}{n_1}, \quad \alpha = \left[1 - \frac{1}{(1 + P/A)^{1/n}} \right], \quad (4)$$

где u^* , P^* — скорость и давление на контактной поверхности, а u_a и P_a — начальные параметры падающей сферической ударной волны, $A_i = \rho_{0i} c_{0i}^2 / n$, n — показатель степени в зависимости давления от плотности. Для железа $A_2 = 5 \cdot 10^4$ МПа, для воды $A_1 = 394$ МПа, показатель степени n для металлов близок к 4, для воды $n = 8$. Упругопластический гистерезис в расчетах принят постоянным и равным $\xi = 0.001$. Давление, возникающее в сферических волнах, идущих из зоны схлопывания кавитационных пузырьков, принято оценивать в пределах 50–1000 МПа. Откольная прочность железа равна 1.55 ГПа.

Параметры, характеризующие кавитационное воздействие в зависимости от давления в падающей ударной волне, приведены в таблице. Динамические импедансы воды и стали существенно различаются, что приводит к значительному увеличению давления на контактной поверхности по сравнению с давлением в падающей сферической ударной волне. Как видно из таблицы, при давлении в 600 МПа в преграде возникает давление, близкое к откольной прочности материала. Критическое число циклов N_0 , характеризующее сопротивляемость материала кавитационному изнашиванию, с ростом давления в ударной волне снижается. Характерно, что при этом снижается глубина проникания продольных трещин в глубь мишени [2]. Это означает, что глубина проникания канальной трещины не характеризует сопротивляемость эрозионному изнашиванию, а ответственна за размер продуктов изнашивания. Ожидается, что при низких давлениях в сферической ударной

волне продукты эрозионного изнашивания будут более крупными, чем при высоких.

Таким образом, характерной особенностью изнашивания поверхности при кавитационном воздействии является последовательное развитие продольных откольных трещин, при этом кольцевые трещины раньше возникают вблизи периферии зоны повреждаемости и в процессе нагружения перемещаются к центральной канальной трещине. Зарождение каждой трещины на поверхности требует N_0 нагружений, при этом в последующие N_0 циклов трещины прорастают, достигая максимальной глубины за $2N_0$. Прорастающие трещины прекращают рост трещин предыдущего поколения и генерируют возникновение трещин последующего поколения. Число N_0 характеризует сопротивляемость материала эрозионному изнашиванию. Эффект „ужаления“ преграды сферическими ударными волнами, который проявляется в образовании системы продольных трещин под зоной контакта, ранее не учитывался в моделях эрозионного изнашивания, что привело к предпочтению модели повреждаемости поверхности ударными струями. В реальных условиях кавитационного воздействия работают оба механизма повреждаемости. Предпочтение следует отдать нагружению поверхности сферическими ударными волнами. Схлопывание множества пузырьков существенно увеличивает интенсивность и длительность коллективной ударной волны, в то время как струйный механизм способен „работать“ при схлопывании индивидуального пузырька.

Список литературы

- [1] Буравова С.Н., Гордополов Ю.А. // ДАН. 2007. Т. 417. № 6. С. 1–4.
- [2] Буравова С.Н., Гордополов Ю.А. // ЖТФ. 2005. Т. 50. В. 8. С. 1038–1042.
- [3] Buravova S.N., Gordopolov Yu.A., Denisov I.V. Shock-assisted materials synthesis and processing (Ed. A. Deridas, Yu. Scheck). Torus Press. 2008. P. 69.
- [4] Haosheng Chen, Shihan Liu, Jiadao Wang, Darong Chen // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 103 510.
- [5] Ioan Padarean, Nedelcu Dorian, Elvira Padarean, Ardar Fay, Trusculescu Marin // Metalurgia International. 2008. V. 13 (6). P. 26.