

К. К. ШАЛЬНЕВ, С. П. КОЗЫРЕВ

РЕЛАКСАЦИОННАЯ ГИПОТЕЗА КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ

(Представлено академиком П. Я. Кочиной 19 VII 1971)

Многочисленные теории механизма кавитационной эрозии предполагают, что основной причиной эрозии являются механические силы, возникающие при замыкании кавитационных пузырьков (¹), их вибрации (²) или от удара микроструек, пронизывающих пузырьки (³).

Однако имеются противоречия между теориями и экспериментальными данными. Так, согласно теории замыкания пузырька, он должен быть окружен безграничной массой жидкости, чтобы его замыкание вызвало давление большой величины. Но в зоне интенсивной эрозии пузырьки в действительности граничат друг с другом, составляя каверну (⁴). Ударные струйки имеют очень ограниченную массу и скорость, чтобы создать силу, достаточную для разрушения металла, если исходить из обычных представлений о механизме удара струй.



Рис. 1

Рис. 1. Импульсы звукового давления, замеренные гидрофоном в гидродинамической трубе 24×100 мм². Расстояние между метками равно 10 мсек.

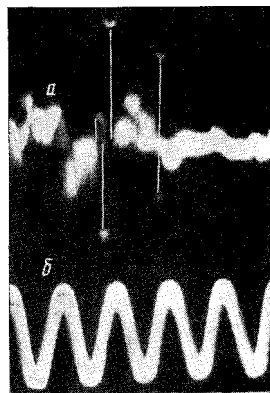


Рис. 2

Рис. 2. *а* — импульсы гидродинамического давления, замеренные в гидродинамической трубе 6×25 мм² датчиком в зоне вторичного очага эрозии, *б* — импульсы времени с частотой 50 кГц

Здесь излагается релаксационная гипотеза механизма кавитационной эрозии, которая устраняет имеющиеся противоречия между теорией и опытом. Релаксационная гипотеза основывается на том, что продолжительность возмущений от действия разрушающих сил настолько мала, что приближается ко времени релаксации сил объемной вязкости жидкости (⁵, ⁶). В случае удара малогабаритных струй и капель о твердое тело релаксационная гипотеза соударения оправдывается и величина удара выражается формулой (⁷)

$$P = mv / \Delta\tau, \quad (1)$$

где m — масса струйки или капли, v — скорость соударения, $\Delta\tau$ — время релаксации сил объемной вязкости данной жидкости.

Приведем здесь результаты наших исследований и исследований других авторов, косвенно доказывающих справедливость релаксационной гипотезы кавитационной эрозии и применимость (1).

Пики давлений. В наших исследованиях гидродинамической кавитации на осциллограммах шума неоднократно обнаруживались пики давления в группе более низких амплитуд.

Одни опыты ⁽⁸⁾ были поставлены в рабочей камере 24×100 мм² с кавитацией за цилиндром $d = 20$ мм при скорости потока до модели $v = 16$ м/сек, стадии кавитации $\lambda = l/d = 2,5$, где l — длина зоны кавитации, считая от оси цилиндра до конца плотной части зоны. Измерялся

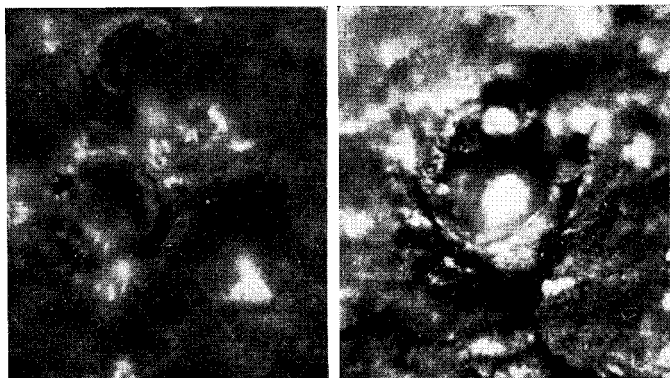


Рис. 3. Язвины эрозии на свинцовом образце, полученные воздействием ультразвуковой кавитацией 20 кгц

шум кавитации. Гидрофон располагался в одной из боковых стенок рабочей камеры против боковой поверхности цилиндра. Ввиду небольшой скорости записи импульса давления можно было определить время импульса только как меньшее 100 мсек (рис. 1).

Другие наши опыты ⁽⁹⁾ с гидродинамической кавитацией были поставлены в рабочей камере 6×25 мм² с кавитацией за цилиндром диаметром $d = 6$ мм при скорости потока $v = 17$ м/сек и стадии кавитации $\lambda = 2,5-3$. Измерялись пульсирующие давления в зоне вторичного очага эрозии, центр тяжести которого был удален от оси цилиндра на $\lambda = 4$. Титанато-бариевый датчик давления в виде диска $d = 3$ мм и толщиной 0,5 мм заделывался в плексигласном дне рабочей камеры заподлицо с его омываемой поверхностью. Импульсы давления регистрировались катодным осциллографом. На осциллограмме (рис. 2) видно, что продолжительность импульсов менее 1 мсек.

В опытах Кутруффа и Радека ⁽¹⁰⁾ с ультразвуковой кавитацией, возбуждаемой волной 27 кгц, импульсы давления измерялись на расстоянии 30—40 мм от центра зоны кавитации, располагавшейся на торце вибрирующей трубки. Продолжительность импульсов изменялась в пределах $(2-1) \cdot 10^{-7}$ сек, т. е. в пределах времени релаксации объемной вязкости воды ^(5, 6).

Зарождение и разрушение каверн. Кратковременность пиков давления согласуется с кинокартинами структуры зоны кавитации, снятыми с частотой 10^6 кадров в сек ⁽¹¹⁾. Зона кавитации образовывалась в поле ультразвукового давления с частотой 10 кгц. Рассмотрение кинокадров показывает, что кавитация возникает за время $\tau < 10^{-7}$ сек, а замыкание пузырьков требует более продолжительного времени.

Форма язвин. Многими авторами неоднократно обнаруживались на поверхности упруго-пластичных металлов язвинки круглой или кольцевой формы. Так, в опытах Новотного ⁽¹²⁾ с эрозией на образцах сурьмы и поваренной соли первичные язвинки имели кольцевую форму. В опытах Кутруфа и Радека ⁽¹⁰⁾ при кратковременном воздействии ультразвуковой кавитацией язвинки тоже имели кольцевую форму с неразрушенной центральной частью язвины. Такой формы язвины наблюдаются

при соударении малогабаритных струй с твердым телом (¹³). Их происхождение объясняется действием отраженных волн напряжений от свободной поверхности тела, противоположной ударяемой.

Возможности временного отвердения части жидкости при кавитации доказывают опыты Корнфельда и наши с ударом жидких струй о твердое тело, если это соударение происходит за время $\tau < \Delta\tau$, меньшее или равное времени релаксации (^{3, 6, 7}).

Рассмотрим вопрос о возможности образования язвочек на пластическом металле при кратковременном действии ультразвуковой кавитации.

Язвочки были получены нами на свинцовых пластинках, подвергавшихся воздействию ультразвуковой кавитации методом облучения (¹⁴). Кавитация возбуждалась концентратором

Таблица 1

R_0/R	v , м/сек	$V \cdot 10^9$, м ³	$m \cdot 10^3$, кг · сек ² · м ⁻¹	$\Delta\tau \cdot 10^7$, сек	P , кг	p , кг/мм ²
3	53	0,26	13	1	9,35	20,7
2	24	0,26	13	1	4,25	9,4

ультразвуковых колебаний с частотой 20 кгц. Расстояние между образцом и излучающим торцом концентратора излучений равнялось $h = 5$ мм. Рабочая жидкость — вода подогревалась до 70° С. Как показывает фото-

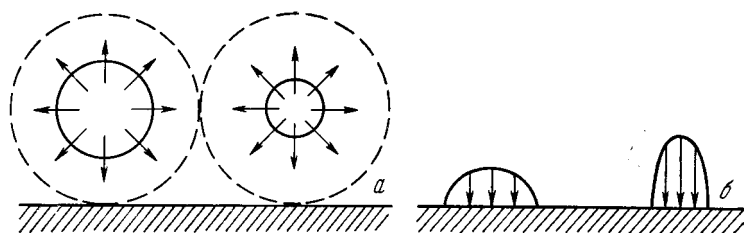


Рис. 4. Схема роста кавитационного пузырька и импульсного давления на стенку. (Пунктиром показана граница пузырька максимального размера.) а — схема роста пузырька в плоскости, нормальной стенке, б — эпюры скорости удара жидкости на стенку

снимок образца (рис. 3), язвочки эрозии имеют в диаметре $\approx 0,6-0,8$ мм.

Один из возможных механизмов образования язвочек представляется нам как следствие высказанной гипотезы и несколько в ином виде, чем это принято.

Предполагается, что первичные язвочки образуются от импульсов давления, сопровождающих внезапное появление пузырька. Это предположение основывается на опытах Меллена (¹⁵), Куттруффа и Радека (¹⁰), которые показали, что в одном цикле развития пузырька имеются два больших импульса давления: при его возникновении и при его захлопывании. Но импульс давления при захлопывании возникает в отдалении от стенки, по крайней мере, на расстоянии одного диаметра пузырька. Границы язвин были бы расплывчаты, не такие четкие, как это наблюдается.

Вероятнее всего, что при возникновении пузырька та часть жидкости, которая прилегает к поверхности тела, испытывает внезапно приложенное давление от расширяющегося пузырька (рис. 4). В этот начальный период образования пузырьков они не соприкасаются друг с другом, окружены сплошной жидкостью и для определения скорости движения стенок пузырька допустимо воспользоваться теорией Рэлея.

Импульсы давления, передающиеся от границ пузырька к поверхности твердого тела и отраженные от нее волны, движущиеся со скоростью звука, могут вызывать временное отвердение части жидкости в пограничном слое. Не объясняется ли этим правильная круглая форма

язвинок на пластичном металле? С этой целью определим величины, входящие в формулу (1).

Действующую массу жидкости, передающей давление твердому телу, примем равной $m = \frac{1}{2}\rho V$, где ρ — плотность воды, V — объем сферы, равной объему пузырька в момент его наибольшего роста, $V = 0,52d^3$. Скорость движения границы пузырька при его расширении вычислим по Рэлею, когда пузырек вырастает до $R_0 = \frac{1}{3}R_0 \div \frac{1}{2}R$. Продолжительность импульса равна времени релаксации $\Delta\tau = 10^{-7}$ сек. Результаты вычислений сведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1 и из данных динамических испытаний свинца на микропрочность, величина силы p превышает ту, которая достаточна для образования микролунки на поверхности свинцового образца. Наибольшая сила давления возникает в начале роста пузырька, а затем по мере увеличения его диаметра эффект давления уменьшается (рис. 4).

Предложенный механизм эрозии объясняет вид поверхности пластинки из индия после кратковременного воздействия кавитацией⁽¹⁰⁾. Она покрыта язвочками, касающимися друг друга, но не пересекающимися.

Таким образом, в основе механизма кавитационной эрозии лежат релаксационные явления в жидкости, которые возникают вследствие возмущений, вносимых периодичностью развития пузырьков и каверн; в условиях гидродинамической кавитации возмущения в жидкости обусловлены периодическим срывом каверн соответственно закону Струхали для срыва свободных вихрей и вибрацией пузырьков;

так как при данных размерах тела частота срыва, а, следовательно, и продолжительность импульса давления (продолжительность возмущения) зависят от скорости потока, то возможна предельная скорость, при которой эрозия не возникает;

предельная скорость эрозии объясняется тем, что время роста пузырьков значительно превышает время релаксации сил вязкости данной жидкости.

Институт проблем механики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
6 IV 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Rayleigh, Phil. Mag., 34, 200 (1917). ² F. Smith, Phil. Mag., 19, № 128 (1935). ³ М. Корнфельд, Упругость и прочность жидкости, М., 1951. ⁴ К. К. Шальнев, Вестник АН СССР, № 6 (1967). ⁵ И. Г. Михайлов, В. А. Соловьев, Ю. П. Сырников, Основы молекулярной акустики, «Наука», 1964. ⁶ В. Н. Мнне-ев, Р. М. Зайдель, ЖЭТФ, 54, № 6 (1968). ⁷ С. П. Козырев, К. К. Шальнев, ДАН, 192, № 3 (1970). ⁸ К. К. Шальнев, Г. Н. Кузнецов, В. И. Ильичев, Электр. обр. мет., № 4 (1967). ⁹ К. К. Шальнев, Н. П. Рубина, ДАН, 154, № 3 (1964). ¹⁰ H. Kuttruff, U. Radek, Acustica, 21, № 5 (1969). ¹¹ A. T. Ellis, Proc. Symp. Cavitation in Hydrodynamics, London, 1956. ¹² H. Nowotny, Werkstoff zerstörung durch kavitation, Berlin, 1942. ¹³ N. L. Hancock, J. H. Brunton, Phil. Trans. Roy. Soc., London, 260, № 1110 (1966). ¹⁴ К. К. Шальнев, ДАН, 67, № 1 (1949). ¹⁵ R. H. Mellen, J. Acoust. Soc. Am., 28, № 3 (1956).