

УДК 532.528:539.4

В.Ю. Шестоперов

КАВИТАЦИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ИХ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Цель работы – разработка критериев оценки эрозионной стойкости материалов конструкций, работающих в кавитирующей жидкости, с целью рационального их выбора как одного из методов борьбы с этим негативным явлением. Рассмотрен процесс образования и развития кавитационной эрозии. Описаны феноменологическая модель эрозионных повреждений, основанная на понятии разрыхления металла в очаге повреждения, а также модель развития кавитационной эрозии. Предложены критерии оценки эрозионной стойкости материалов с целью их рационального выбора. Проведена апробация этих критериев на ряде конструкционных материалов.

Разработанные критерии оценки позволяют более обоснованно осуществить такой выбор по сравнению с традиционным по потерям массы материала, поскольку они точнее учитывают физику процесса.

Ключевые слова: кавитация, разрушение материалов, эрозионная стойкость, критерии оценки.

Элементы многих конструкций и устройств часто работают в условиях кавитирующей жидкости (движительные рулевые комплексы судов, крыльевые устройства судов с динамическими принципами поддержания, детали насосов, двигателей, подшипников, топливной аппаратуры и др.), подвергаясь интенсивной эрозии [1, 2]. Конструктивно-эксплуатационные методы борьбы с их кавитационным разрушением (ограничение режимов эксплуатации, сверление противоэрозионных отверстий и т.п.) зачастую не дают желаемого результата. В этих условиях рациональный выбор конструкционного материала во многом способствует успешной борьбе с этим негативным явлением. Этот выбор связан с необходимостью определения их эрозионной стойкости по критериям оценки. Установлено [1, 2], что главной причиной кавитационной эрозии металлических поверхностей является схлопывание вблизи них кавитационных пузырьков. При этом кинетика процесса разрушения материала описывается кривой эрозии (потерь массы или объема во времени), на которой, как при процессе усталости, выделяют стадии образования и развития эрозионных повреждений (рис. 1).



Рис. 1. Кривая кавитационной эрозии:

I – инкубационный период; II, III – периоды кавитационного упрочнения и разупрочнения

Традиционным критерием эрозионной стойкости материала служат потери его массы (объёма) за определённый период времени. Этот критерий не учитывает условия нагружения, физику процесса и свойства материала.

В работе [3] на основе рассмотрения квазистатистического детерминирования воздействия на поверхность материала схлопывающихся кавитационных пузырьков построена феноменологическая модель процесса эрозии на стадии инкубационного периода, основанная на понятии деформационного разрыхления, введенного впервые В. В. Новожиловым [4] и используемая в дальнейшем в работах В. М. Волкова [5]. При схлопывании в точке O над поверхностью кавитационных пузырьков на расстоянии r_0 от неё (рис. 2) на ней образуется пластический кратер a с пластическим ядром d под ним. Критическое разрыхление θ_* , приводящее к образованию очага разрушения глубиной z_* , образуется за время инкубационного периода t_* после схлопывания критического числа N_* пузырьков. При этом объём повреждённого и удаляемого из кратера материала будет пропорционален z_*^3 .

Величина z_* определяется по выражению

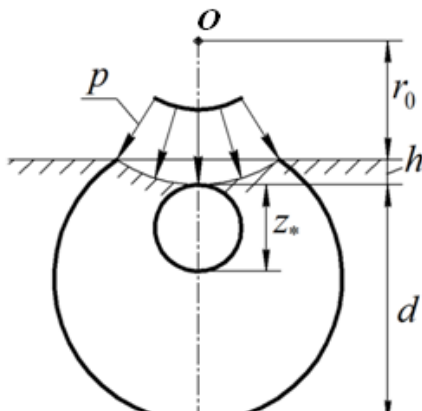


Рис. 2 Очаг повреждения при кавитационной эрозии: p – давление при схлопывании пузырьков

$$z_* = d_* \left\{ 1 - \frac{1}{\gamma_*} \ln \left[\left(\frac{C_0}{\lambda_T^s} \right)^{\frac{1}{s}} + 1 \right] \right\}, \quad (1)$$

где γ_* – значение параметра γ при $N_*=1$; γ – параметр, связанный с размерами ядра d и глубиной кратера; d_* – значение d при $N_*=1$; C_0 – постоянная Л. Коффина; $\lambda_T = 0,002$; s – постоянная материала ($s=2$ в случае линейного упрочнения). Предлагаемая модель образования эрозионных повреждений учитывает упругие, пластические и циклические свойства материала и позволяет определить продолжительность инкубационного периода эрозии для циклически разупрочняющегося, упрочняющегося и стабильного материалов соответственно.

$$t_* = \tau \left\{ 1 + \frac{1}{s\beta} \ln \left[1 + s\beta \frac{C_0}{\lambda_T^s} \cdot \frac{1}{\left[\exp \gamma \left(1 - \frac{z_*}{d} \right) - 1 \right]^s} - 1 \right] \right\},$$

$$t_* = \tau \left\{ 1 + \frac{1}{w} \left[\frac{C_0}{\lambda_T^s} \cdot \frac{1}{\left[\exp \gamma \left(1 - \frac{z_*}{d} \right) - 1 \right]^s} - 1 \right] \right\}, \quad (2)$$

$$t_* = \tau \frac{C_0}{\lambda_T^s} \cdot \frac{1}{\left[\exp \gamma \left(1 - \frac{z_*}{d} \right) - 1 \right]^s},$$

где $w = (1 - s\varphi)^{-1}$; φ , β – коэффициенты интенсивности циклического упрочнения и

разупрочнения. В выражениях (2) τ определяется конкретным типом и процессом кавитации в жидкости. Для его определения необходимо исследовать процесс с позиций гидромеханики. Чтобы оценить кавитационную стойкость материала на стадии образования эрозионных повреждений в качестве критерия используем параметр $\bar{R}_* = \frac{E_t N_*}{z_*^3}$ [6], в котором E_t - энергия, поглощенная в очаге эрозии при схлопывании пузырька. Этот параметр адекватен удельной энергии, поглощённой в единице объёма удаляемого материала за время инкубационного периода.

Для описания стадии развития эрозионных повреждений используем соотношение К. Стеллера [7] о балансе работы внешних сил и произведённой работы при постоянстве мощности, затрачиваемой на разрушение:

$$RV = Pt, \tag{3}$$

где V – эрозионные потери объёма материала за время t ; R – удельная поглощённая в объёме энергия (сопротивление металла эрозии); P – мощность, затрачиваемая на разрушение. Если задаться законами изменения сопротивления R эрозии на стадии развития эрозионных повреждений, как состоящей из периодов упрочнения и разупрочнения, соответственно в виде [3]

$$\begin{aligned} R &= R_* + A(t-t_*)^\alpha, \\ R &= R_g \left[1 + \frac{1}{k} e^{\kappa_p(t-t_u)} \right], \end{aligned} \tag{4}$$

то получим выражения, описывающие процесс эрозии в периоды упрочнения и разупрочнения соответственно:

$$\begin{aligned} V &= V_* + A_1(t-t_*)^{1-\alpha}, \\ V &= V_u + \frac{C_1(t-t_u)}{1 + \frac{1}{k} e^{-\kappa_p(t-t_u)}}, \end{aligned} \tag{5}$$

В формулах (3) и (4) R_* , V_* - сопротивление металла эрозии и первоначальные потери объёма в конце инкубационного периода; A , A_1 , C_1 – постоянные; α , κ_p – коэффициенты кавитационного упрочнения и разупрочнения; k – коэффициент запаса сопротивления металла эрозии; t_u , V_u – продолжительность периода упрочнения и потери в конце его (рис. 1); R_g – значение R при $t \rightarrow \infty$. Для оценки эрозионной стойкости материалов на стадии развития кавитационных повреждений предлагается параметр [6]

$$\bar{\delta} = \frac{1}{P(t-t_*)} \int_{t_*}^t R dt. \tag{6}$$

Использование выражения (6) с учетом зависимостей (4) в предположении, что $t_u \gg t^*$, $V_u \gg V^*$, $t \gg t^*$, позволяет получить формулы для определения $\bar{\delta}$ в периоды упрочнения и разупрочнения соответственно в виде

$$\begin{aligned} \bar{\delta} &= \frac{t_u}{V_u} \left[\frac{\alpha}{1-\alpha} + \frac{\alpha}{1+\alpha} \left(\frac{t}{t_u} \right)^\alpha \right], \\ \bar{\delta} &= \frac{t_u}{V_u} \left[\frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^2} \left(\frac{t_u}{t} \right) + \frac{k}{(1+k)(1-\alpha)} \left(1 - \frac{t_u}{t} \right) + \frac{1 - e^{-\kappa_p(t-t_u)}}{\kappa_p t (1-\alpha)(1+k)} \right]. \end{aligned} \tag{7}$$

Указанные критерии \bar{R}_* и $\bar{\delta}$ апробировались на конструкционных сплавах Д16АТ, АМгб1гк, АМгАМ, Д1АТ, К48-2Т1, Д19АМ, Л63 и 12Х18Н10Т. При этом исследуемые материалы выстроены в ряд кавитационной стойкости [6]. Кривые кавитационной эрозии для этих материалов были получены экспериментально на ультразвуковой кавитационной установке [8]. Наряду с этими критериями проведена и широко используемая традиционная

оценка по потерям массы. Положение материалов в рядах оказалось различным. Однако следует отметить, что оценка по рассмотренным критериям, по мнению автора является более объективной, поскольку в них учитывается комплекс механических свойств материалов (упругих, пластических, прочностных, циклических и трещиностойкость).

Зависимости (5), описывающие развитие эрозионных повреждений во времени, получены в предположении постоянства мощности P , затрачиваемой на разрушение. Однако в период разупрочнения, особенно при $t \gg t_u$, жидкость, заполняя глубокие кавитационные раковины, начинает оказывать буферное действие [1]. Поэтому логично положить уменьшение P , которое выразим зависимостью

$$P_t = P e^{-\chi(t-t_u)}, \quad (8)$$

где χ - постоянная. Тогда, записывая работу внешних сил как

$$E_p = \int_{t_u}^t P_t dt, \quad (9)$$

из уравнения баланса работ для периода кавитационного разупрочнения получим выражение для эрозионных потерь объёма материала в указанном периоде

$$V = V_u + \frac{c_1}{\chi} \frac{1 - e^{-\chi(t-t_u)}}{1 + \frac{1}{k} e^{-\kappa_p(t-t_u)}}. \quad (10)$$

Из уравнения (10) как частный случай при $\chi = 0$ следует вторая зависимость в выражениях (5).

На рис. 3 показана кривая кавитационной эрозии с учётом описанного уравнением (10) процесса затухания.

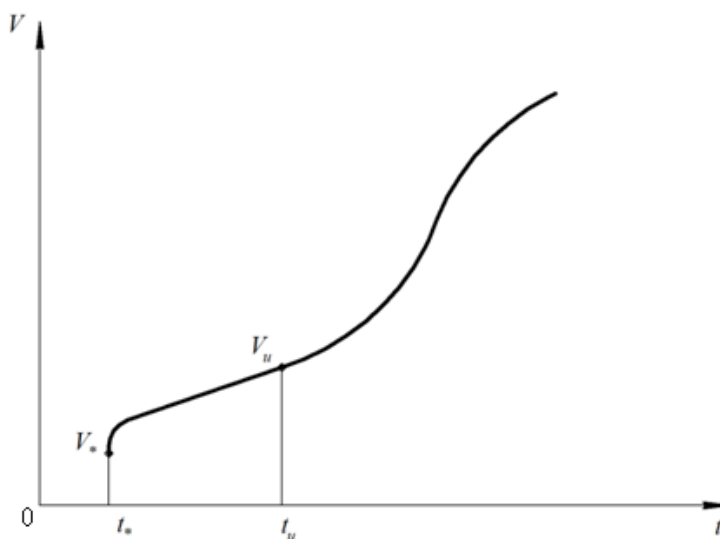


Рис. 3. Кривая кавитационной эрозии с учётом буферного действия жидкости в очаге эрозии

Кавитационное воздействие является случайным микроударным процессом, поэтому эрозионная стойкость сплавов будет определяться их структурными составляющими, свойствами зерен, строением тонкой структуры. Описанные выше модели процесса эрозии этого не учитывают. Следует также учитывать и вероятностную природу процесса. Остается открытым вопрос о внешних силах кавитационного воздействия.

Библиографический список

1. **Козырев, С.П.** Гидроабразивный износ металлов при кавитации / С.П. Козырев. – М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.

2. **Георгиевская, Е.П.** Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е.П. Георгиевская. – Л.: Судостроение, 1978. – 208 с.
3. **Волков, В.М.** Сопротивление элементов металлических конструкций кавитационному разрушению / В.М. Волков, В.Ю. Шестоперов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и автоматизация решения задач упругости и пластичности: Всесоюз. межвуз сб. – Горький: ГГУ, 1982. С. 51–59.
4. **Новожилов, В.В.** О пластическом разрывлении // ПММ. 1965. Т. 29. №4. С. 75–83.
5. **Волков, В.М.** Феноменологический анализ мало-и многоциклового усталости металлов // Тр. ГПИ им. А.А. Жданова. 1974. Т. 30. Вып. 13.
6. **Шестоперов, В.Ю.** Разрушение материалов и тонкостенных элементов конструкций в условиях воздействия кавитирующей жидкости // Надежность и механика разрушения судовых конструкций: межвуз. сб. научн. тр. – Горький: ГПИ, 1990. С. 61–67.
7. **Шестоперов, В.Ю.** Экспериментальное исследование кавитационной эрозии судостроительных материалов // Теория и прочность ледокольного корабля. – Горький: ГПИ, 1980. С. 57–60.

*Дата поступления
в редакцию 04.12.2013*

V. Yu. Shestoperov

CAVITATION DAMAGE OF MATERIALS AND CRITERIA FOR ASSESSING THE EROSION RESISTANCE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The assessment criteria development of erosion resistance of structure material, working of cavitating fluid and addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework considers cavitation erosion generation and developing. The study characterizes phenomenological model of cavitation damage generation, based on conception of material shattering in a damage site and model of cavitation erosion developing.

Findings: Developed assessment criteria allow more reasonable choice of material in comparison with traditional mass loss criteria, as they more accurately takes into account physics of the process.

Research limitation/implications: The present study provides a starting point for further research in assessment criteria of material cavitation erosion resistance.

Originality/value: Developed assessment criteria are experimentally approbated on a series of constructional materials.

Key words: cavitation, damage of materials, erosion resistance, criteria for assessing.