

УДК.532.528:539.4

В.Ю. Шестоперов

РАЗРУШЕНИЕ И ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В КАВИТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследовано влияние напряженно-деформированного состояния элементов конструкций (одноосного и двухосного растяжения) на кавитационное разрушение материалов. Получены кривые их эрозии, показавшие различное влияние на кавитационное разрушение на разных периодах процесса. Представлены результаты оценки стойкости исследуемых конструкционных сплавов по предлагаемым критериям оценки в условиях одноосного и двухосного растяжения. Приведены соображения по учету случайного характера процесса кавитационного воздействия. Исследовано влияние кавитирующей жидкости на образование и докритический рост усталостных трещин на примере одного из конструкционных сплавов. Учет описанных в работе факторов для элементов конструкций, работающих в кавитирующей жидкости, позволяет более объективно оценивать их эрозионную стойкость и трещиностойкость.

Ключевые слова: кавитация, разрушение элементов конструкций, эрозионная стойкость, трещиностойкость, критерии оценки.

Элементы многих конструкций (движительно-рулевые комплексы и крыльевые устройства судов, детали насосов и т.п.) часто работают в экстремальных условиях, подвергаясь статическому и циклическому нагружениям, а также воздействию кавитирующей жидкости. При проектировании таких конструкций следует учитывать особенности их эксплуатации при оценке их усталостной трещиностойкости, долговечности и эрозионной стойкости в условиях кавитационного воздействия, а также случайный характер кавитационного процесса и напряженно-деформированное состояние (НДС) элемента конструкции.

Влияние НДС на эрозионную стойкость при кавитации. В работах [1,2] предложены критерии оценки стойкости материалов в условиях воздействия кавитирующей жидкости на стадиях образования и развития эрозионных повреждений и проведена их апробация на ряде материалов. При этом материалы построены в ряд эрозионной стойкости. Так на стадии развития кавитационной эрозии использован параметр $\bar{\delta}_M = \bar{\delta} / \rho_M$, где ρ_M - плотность материала, $\bar{\delta}$ определяется по формулам, соответственно, в период кавитационного упрочнения

$$\bar{\delta} = \frac{t_u}{V_u} \left[\frac{\alpha}{1-\alpha} + \frac{1}{1+\alpha} \left(\frac{t}{t_u} \right)^\alpha \right], \quad (1)$$

а в период кавитационного разупрочнения

$$\bar{\delta} = \frac{t_u}{V_u} \left[\frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^2} \left(\frac{t_u}{t} \right) + \frac{k}{(1+k)(1-\alpha)} \left(1 - \frac{t_u}{t} \right) + \frac{1 - e^{-k_p(t-t_u)}}{k_p t (1-\alpha)(1+k)} \right] \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) α , k_p – коэффициенты запаса упрочнения и разупрочнения; k – коэффициент запаса сопротивления металла эрозии; t_u , V_u – соответственно продолжительность периода упрочнения и потери объема металла в конце его.

Влияние напряженно-деформированного состояния элемента конструкции на его эрозионную стойкость при кавитационном воздействии исследовалось на конструкционных сплавах АМг2Н и 12Х18Н10Т. Использовалась ультразвуковая кавитационная установка [3], в которую помещались нагрузочные устройства с установленными в них образцами из указанных выше сплавов. В образцах создавалось одноосное и двухосное растяжения. При этом

относительное перемещение захватов устройств осуществлялось на основе винтовой пары. По результатам испытаний построены кривые $\Delta M - t$ кавитационной эрозии (потерь массы во времени) (рис. 1) при различных гомологических напряжения σ_r .

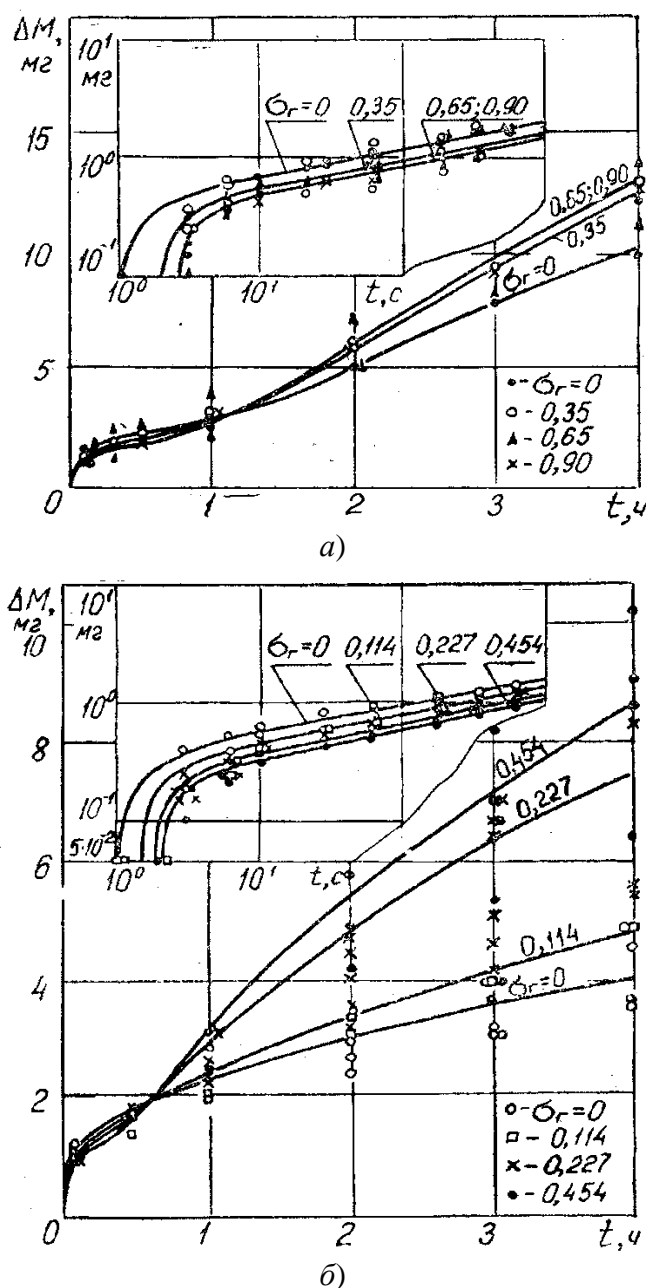


Рис. 1. Влияние НДС на кавитационную эрозию сплава АМг2Н:
а – одноосное растяжение; б – двухосное растяжение

Из рис. 1, 2 видно что влияние НДС различно на разных периодах кавитационной эрозии: в период упрочнения растяжение приводит к уменьшению потерь массы, а в период разупрочнения наоборот. С увеличением σ_r интенсивность влияния НДС уменьшается и, начиная с $\sigma_r \approx 0,5$ оно почти не сказывается. Для оценки эрозионной стойкости использовался параметр $\bar{\delta}_M$ и зависимости (1) и (2) для моментов времени $t=0,0278$ ч (период упрочнения) и $t=3$ ч (период разупрочнения). На рис. 3 показано изменение эрозионной стойкости сплава АМг2Н в зависимости от величины σ_r , из которого видно, что в период упрочнения стойкость увеличивается, а в

период разупрочнения уменьшается, когда глубокие эрозионные раковины служат концентраторами напряжений и растягивающие усилия играют негативную роль.

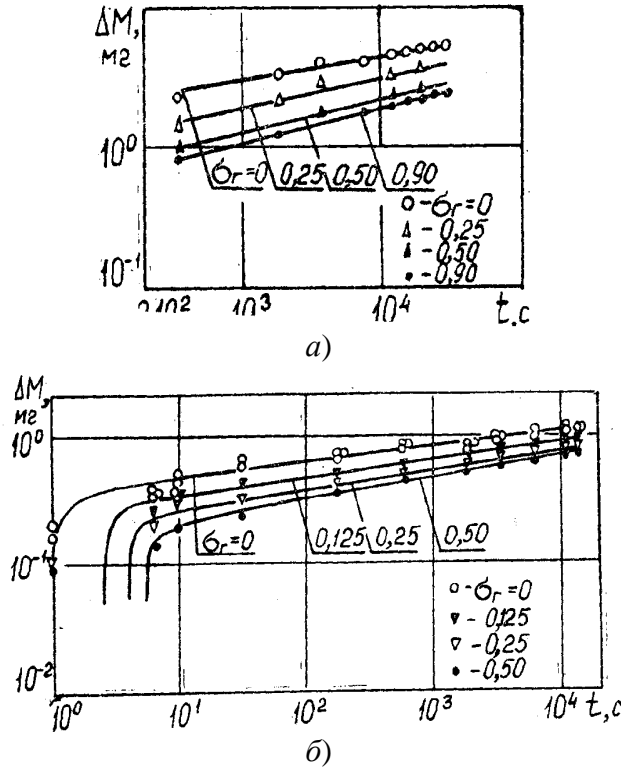


Рис. 2. Влияние НДС на кавитационную эрозию сплава 12X18H10T:
 а – одноосное растяжение; б – двухосное растяжение

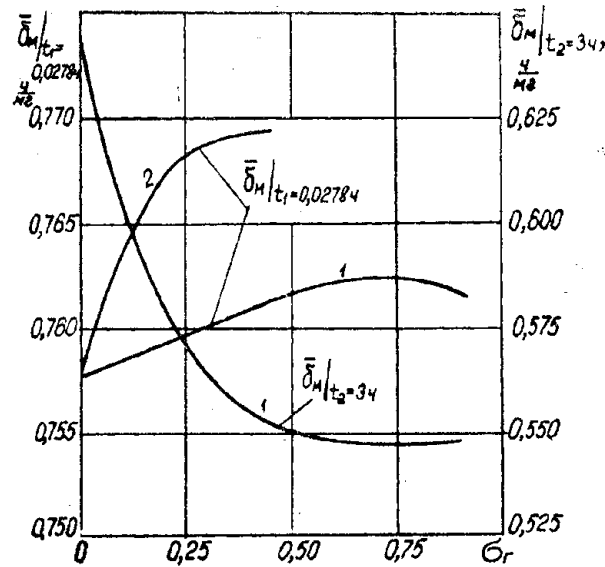


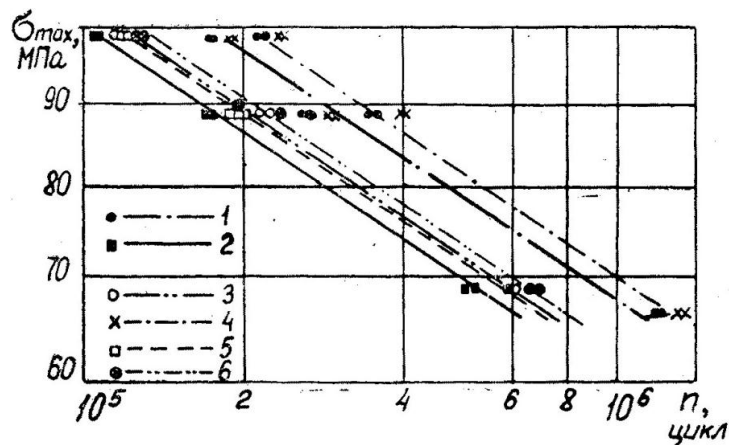
Рис. 3. Влияние НДС на эрозионную стойкость сплава АМг2Н:
 1 – одноосное растяжение; 2 – двухосное растяжение

Влияние случайного характера кавитационного воздействия. Описанные в работах [1, 2] модели кавитационной эрозии и критерии эрозионной стойкости построены в предположении детерминированного воздействия кавитационных пузырьков на поверхности металла. В действительности же этот процесс является случайным. Описывая закон распределения случайной величины давления p от схлопывания кавитационных пузырьков законом Рэлея, можно получить продолжительность инкубационного периода t^* при случайном процессе

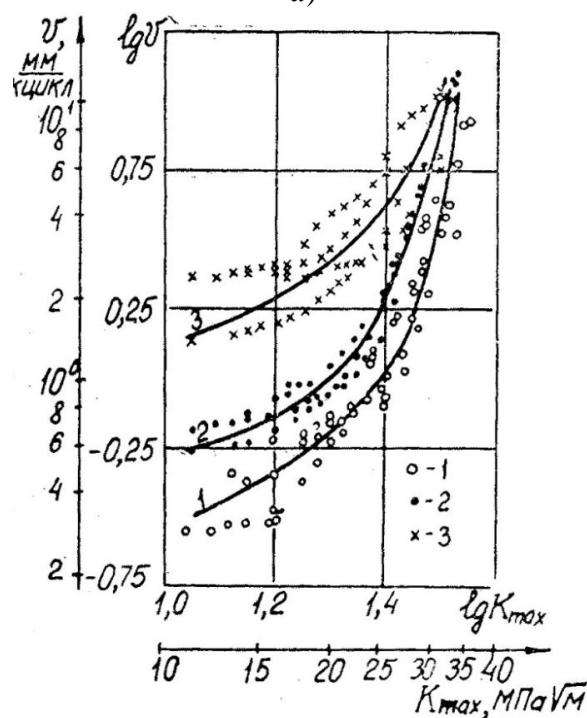
кавитационного воздействия. Так, например, в случае циклически разупрочняющегося материала он может быть определен по выражению

$$t^* = \tau \left\{ 1 + \frac{1}{s\beta} \ln \left[1 + s\beta \left(\frac{C_0}{\lambda_T^s \Phi(D_p)} - 1 \right) \right] \right\}, \quad (3)$$

где D_p – дисперсия давления; $F_t = \exp\beta(t/\tau - 1)$; β – коэффициент интенсивности циклического разрушения, τ – период схлопывания кавитационных пузырьков, C_0 – постоянная Л.Коффина, $\lambda_T=0,002$, s – постоянная материала.



а)



б)

Рис. 4. Влияние кавитации на усталостное разрушение сплава АМгб1:

а – кривые усталости (образование трещин: 1 – на воздухе; 2 – в воде; 3 – при кавитации; разрушение образцов: 4 – на воздухе; 5 – в воде; 6 – при кавитации); б – кинетические диаграммы усталости (1 – на воздухе; 2 – в воде; 3 – при кавитации)

Влияние кавитации на усталостное разрушение элементов конструкций. Исследования по влиянию кавитирующей жидкости на образование и докритический рост усталостных трещин проведены на плоских образцах из сплава АМгб1. Для этого использовалась ультразвуковая кавитационная установка, помещенная на нижнюю траверсу пульсатора

МУП-50, в захватах которого зажимался испытываемый образец, проходящий через рабочий резервуар с кавитирующей проточной водой. По результатам эксперимента построены кривые усталости σ_{\max} - n и кинетические диаграммы усталости ν - K_{\max} (рис. 4) (σ_{\max} – максимальное напряжение растяжения, n – число циклов до образования трещины и до разрушения образца, K_{\max} – коэффициент интенсивности напряжений). В результате анализа эксперимента установлено снижение усталостной прочности испытываемого сплава в проточной воде по сравнению с воздухом в 1,75 раза, обусловленное эффектом П.А. Ребиндера [4], а также повышение усталостной прочности при создании в воде кавитации на 13% по сравнению с некавитирующей жидкостью вследствие упрочнения поверхности образца от схлопывания кавитационных пузырьков (рис 4, а). Установлено, что скорость докритического роста усталостной трещины в кавитирующей воде возрастает по сравнению с некавитирующей в 2,5 раза, а в последней по сравнению с воздухом – в 1,5 раза (рис. 4, б).

Первое обстоятельство объясняется, по-видимому, интенсификацией коррозионной активности воды, а второе – электрохимическими процессами в вершине трещины усталости.

Таким образом, в работе рассмотрены влияние НДС на эрозию и стойкость, а также кавитации на усталостное разрушение элементов конструкций. Дальнейшее комплексное исследование процессов эрозии и усталостного разрушения позволит успешно решить вопросы проектирования элементов конструкций, работающих в кавитирующей жидкости.

Библиографический список

1. **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. / Горьковский университет. Горький, 1982. С. 51–59.
2. **Шестоперов, В.Ю.** Кавитационное разрушение материалов и критерии оценки их эрозионной стойкости // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. №5 (102). С. 79–83.
3. **Шестоперов, В.Ю.** Экспериментальное исследование кавитационной эрозии судостроительных материалов // Теория и прочность ледокольного корабля; Горьковский политехнический институт. – Горький, 1980. С. 57–60.
4. **Волков, В.М.** Механические свойства материалов: учеб. пособие / В.М. Волков; Горьковский политехнический институт. – Горький, 1973. – 130 с.

*Дата поступления
в редакцию 11.12.2014*

V. Yu. Shestoporov

DAMAGE (FAILURE) AND EVALUATION OF DURABILITY OF CONSTRUCTIVE ELEMENTS OPERATING IN CAVITATING LIQUIDS

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

The influence of stress-strain state of constructive elements (uniaxial and biaxial tension) on cavitation failure of the materials is studied. Their erosion curves are drawn showing different effect on the cavitation failure at different stages of the process. The results of evaluation of structural alloys strength being examined are presented basing on the suggested evaluation criteria in uniaxial and biaxial tension conditions. Considerations are brought in concerning the random nature of the cavitation effect process. The influence of the cavitation liquid on forming and undercritical development of fatigue cracks by the example of one of structural alloys is studied. Records of the factors described in this research for the constructive elements, operating in a cavitating liquid, allow evaluating their resistance to erosion and cracking in a more objective manner.

Key words: cavitation, failure (damage) of constructive elements, erosion strength (resistance), cracking strength, evaluation criteria.