

УДК.532.528:539.4

В.Ю. Шестоперов СОПРОТИВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РАЗРУШЕНИЮ В КАВИТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Получены и проанализированы кривые кавитационной эрозии сплавов АМг2Н и 12Х18Н10Т в условиях одноосного и двухосного растяжения. Показано различное влияние напряженно-деформированного состояния на кавитационное разрушение этих сплавов. По предложенным критериям проведена оценка их эрозионной стойкости в условиях одноосного и двухосного растяжения. Изучено влияние кавитирующей жидкости на образование и докритический рост усталостных трещин сплава АМгб1. Учет напряженно-деформированного состояния элементов конструкций в условиях кавитационного воздействия жидкости позволяет более точно оценивать их стойкость к эрозии.

Ключевые слова: кавитационная эрозия, напряженно-деформированное состояние, критерии эрозионной стойкости, трещиностойкость.

Введение

Движительно-рулевые комплексы судов, крыльевые устройства судов с динамическими принципами поддержания, детали насосов, двигателей, подшипников и т.п. часто работают в экстремальных условиях, подвергаясь статическому и циклическому нагружению, а также воздействию кавитирующей жидкости. Проектирование элементов таких конструкций должно учитывать особенности их эксплуатации, а именно – оценивать их усталостную трещиностойкость, долговечность, эрозионную стойкость в кавитирующей жидкости, а также их напряженно-деформированное состояние (НДС). Рациональный выбор материала для элементов таких конструкций как одно из важных звеньев проектирования, возможен, в частности, при наличии критериев эрозионной стойкости при кавитационном воздействии жидкости. Традиционным таким критерием служат потери массы (объема) материала за заданный период времени. Этот критерий не учитывает условий нагружения, физики процесса, свойств материала и НДС элемента конструкции.

В работах [1,2] предложены новые критерии оценки стойкости материалов в кавитирующей жидкости на стадиях образования (инкубационный период) и развития (период кавитационного упрочнения и разупрочнения) эрозионного процесса, позволяющие учесть указанные выше недостатки. Так, на стадии развития эрозии предложен в качестве критерия оценки параметр $\bar{\delta}_m = \bar{\delta} / \rho_m$, где ρ_m – плотность материала, $\bar{\delta}$ определяется в периоды упрочнения и разупрочнения соответственно по формулам

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

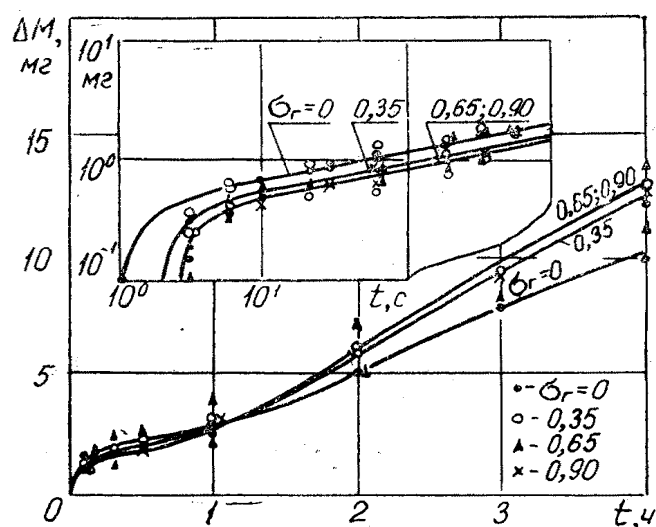
$$\bar{\delta} = \frac{t_u}{V_u} \left(\frac{1+\alpha^2}{1-\alpha^2} \left(\frac{t_u}{t} \right) + \frac{k}{(1+k)(1-\alpha)} \left(1 - \frac{t_u}{t} \right) + \frac{1 - e^{-k_p(t-t_u)}}{k_p t (1-\alpha)(1+k)} \right). \quad (2)$$

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

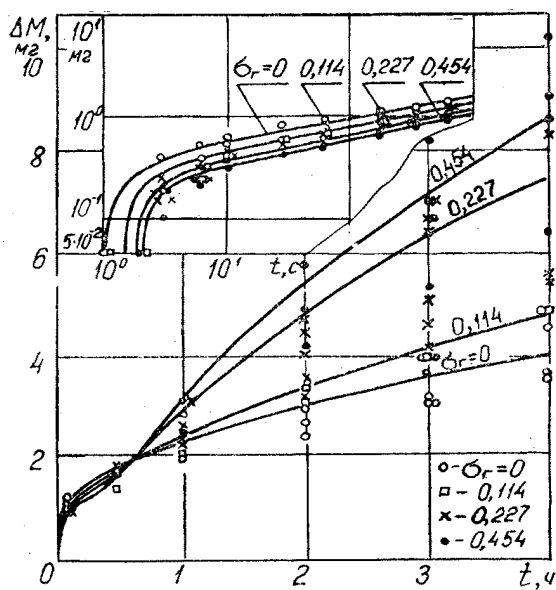
В данной работе также предпринята попытка изучения и анализа влияния кавитирующей жидкости на трещиностойкость элементов конструкций.

Влияние НДС на эрозионную стойкость при кавитации

Влияние НДС элемента конструкции на его эрозионную стойкость при кавитационном воздействии исследовалось на конструкционных сплавах АМг2Н и 12Х18Н10Т. В испытаниях применялась ультразвуковая кавитационная установка [3], в которой размещались нагрузочные устройства с встроенными в них образцами из сплавов АМг2Н и 12Х18Н10Т. Во время испытаний в образцах создавалось одноосное и двухосное растяжения. Относительное перемещение захватов устройств осуществлялось на основе винтовой пары. По итогам испытаний были получены графики зависимости $\Delta M - t$ кавитационной эрозии (зависимость потерь массы во времени) (рис. 1) при различных гомологических напряжениях σ_r ($\sigma_r = \sigma_t / \sigma$, σ_t – предел текучести материала, σ – действующее напряжение).



а)



б)

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

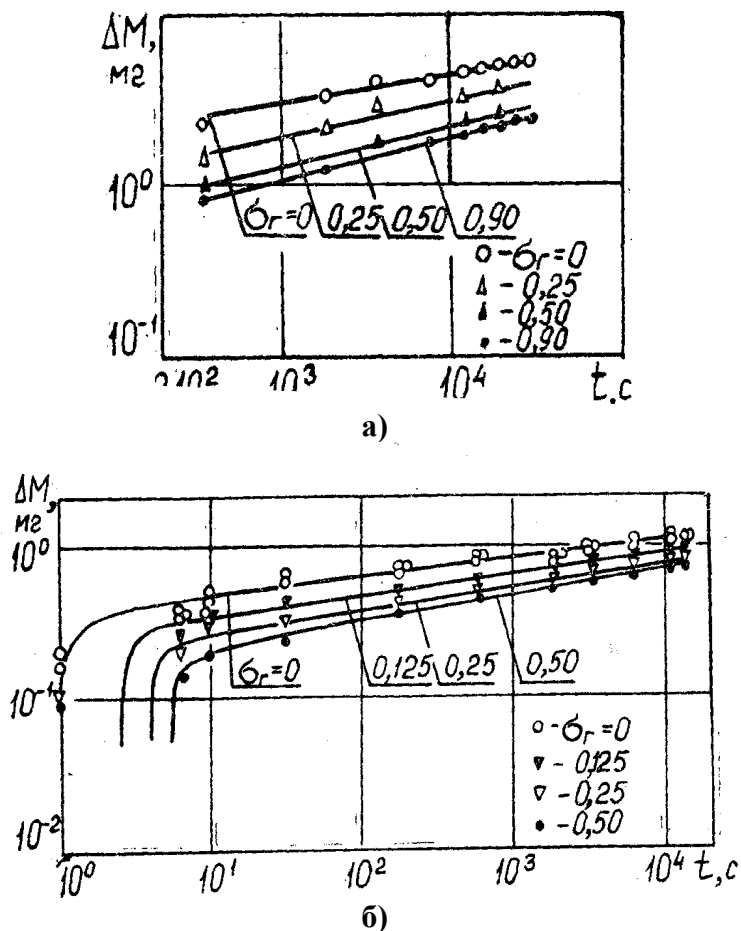


Рис. 2. Влияние НДС на кавитационную эрозию сплава 12X18N10T:

а – одноосное растяжение; б – двухосное растяжение

Из графиков на рис. 1, 2 можно сделать вывод, что напряженно-деформированное состояние оказывает различное влияние в разные периоды кавитационной эрозии: в период упрочнения растяжение приводит к уменьшению потерь массы, а в период разупрочнения наоборот. При увеличении σ_r интенсивность влияния НДС уменьшается и, начиная с $\sigma_r \approx 0.45$ оно почти не оказывает влияния. Чтобы оценить эрозионную стойкость вводится параметр $\bar{\delta}_m$ и зависимости (1) и (2) для моментов времени $t = 0.0279$ ч (период упрочнения) и $t \approx 3$ ч (период разупрочнения). На рис. 3 отображена зависимость эрозионной стойкости сплава АМг2Н от величины σ_r , показывающая, что в период упрочнения стойкость увеличивается, а в период разупрочнения уменьшается, когда глубокие эрозионные раковины являются концентраторами напряжений и растягивающие усилия имеют отрицательное воздействие.

При $\sigma_r > 0$ продолжительность периода упрочнения уменьшается, быстрее начинает вступать в силу процесс кавитационного разупрочнения. В периоде разупрочнения растягивающие напряжения снижают стойкость сплавов, увеличивая эрозионные потери образцов сплава АМг2Н. Для стали 12X18N10T этот период не был достигнут даже по истечению 8 часов испытаний, что говорит о ее высокой эрозионной стойкости.

Следует отметить, что «противоборство» двух процессов при кавитационном разрушении: образование очагов эрозии и их дальнейшее развитие с деформационным упрочнением на дне их (период кавитационного упрочнения), а также рост концентрации напряжений на поверхности, создаваемый при дальнейшем развитии очагов эрозии, образование и развитие, в связи с этим, сети поверхностных трещин, приводящих к потерям массы материала

(период кавитационного разупрочнения). На стадии упрочнения растягивающие напряжения увеличивают интенсивность упрочнения и уменьшают глубину наклепанного слоя (величину пластического ядра). Это и объясняет наблюдаемый эффект.

На стадии кавитационного разупрочнения приложение $\sigma_r > 0$ приводит к росту концентрации напряжений, более интенсивному образованию и росту трещин и, как следствие, большим потерям массы.

Сравнивая результаты испытаний сплава АМг2Н при одноосном и двухосном растяжении, следует отметить следующее (рис. 1):

- 1) двухосное состояние как более «жесткое» приводит к более интенсивному упрочнению и, как следствие, меньшим потерям;
- 2) влияние на продолжительность периода упрочнения сильнее для двухосного, нежели для одноосного растяжения;
- 3) величина эрозионных потерь образцов в конце периода упрочнения при двухосном растяжении меньше, чем при одноосном;
- 4) скорость изнашивания в конце периода кавитационного упрочнения в условиях двуосного растяжения выше, чем у одноосного, что объясняется причинами, указанными выше в п. 1;
- 5) двухосность напряжения приводит к укорочению периода упрочнения, т.е., к более раннему началу преобладания процесса концентрации напряжений в очагах эрозии;
- 6) в период разупрочнения влияние двухосности на процесс эрозии сказывается сильнее (уменьшение k_p и увеличение k), чем при одноосном нагружении;
- 7) наличие двухосного растяжения как более «жесткого» напряженного состояния приводит к более раннему появлению глубоких очагов эрозии, проявлению демпфирующего влияния жидкости и затуханию эрозионного процесса.

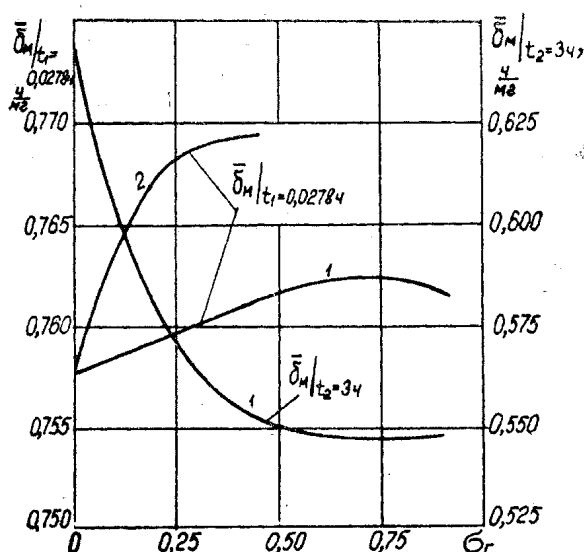


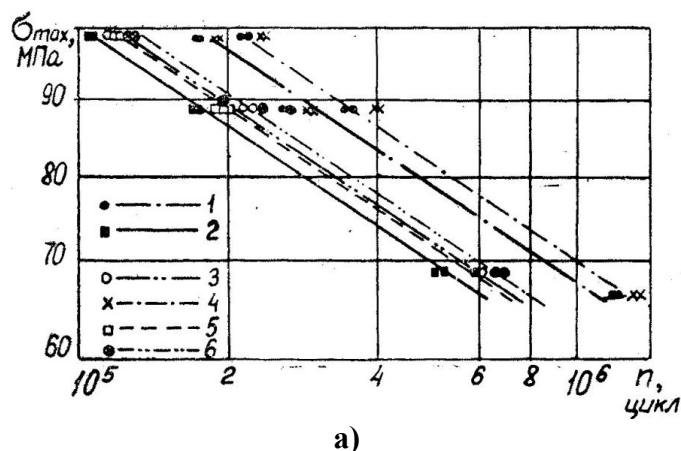
Рис. 3. Влияние НДС на эрозионную стойкость сплава АМг2Н:

1 – одноосное растяжение; 2 – двухосное растяжение

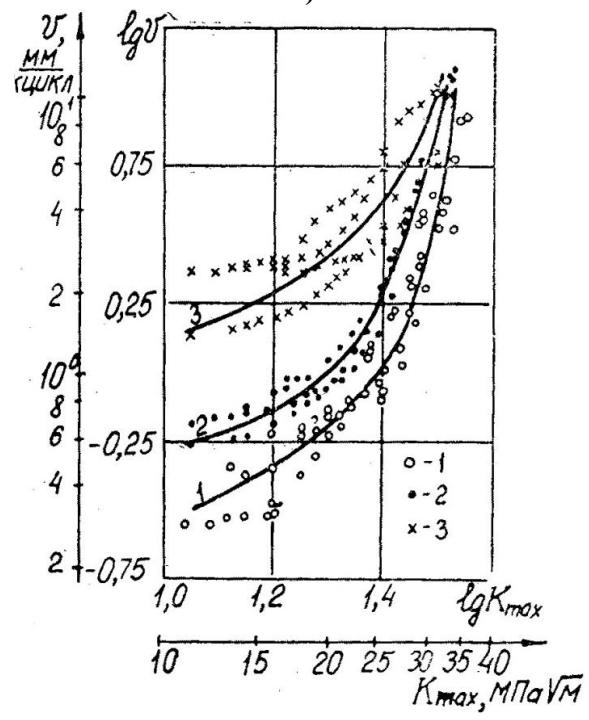
Влияние кавитации на усталостное разрушение элементов конструкций

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 $\sigma_{max}-n$ и кинетические диаграммы усталости $U-K_{max}$ (рис. 4), где σ_{max} – максимальное напряжение растяжения, n – число циклов до образования трещины и до разрушения образца, K_{max} – коэффициент интенсивности напряжений.



а)



б)

Рис. 4. Влияние кавитации на усталостное разрушение сплава АМг61:

- 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)

Исследования показали следующие результаты.

1. Водопроводная вода, являясь коррозионной средой, вызывает значительное снижение трещиностойкости исследуемого сплава. Так долговечность материала с точки зрения образования усталостной трещины в диапазоне выбранных напряжений σ_{max} падает в среднем в 1,74 раза, а с точки зрения разрушения образца в 1,78 раза (рис. 4, а). Указанное снижение долговечности объясняется [4] уменьшением свободной поверхностной энергии, т.е., уменьшением работы образования новых поверхностей вследствие адсорбции

поверхностно-активных веществ жидкости (хлор, водород) на металле (эффект П.А. Ребиндера).

2. В кавитирующей проточной воде долговечность материала ниже, чем на воздухе, но несколько выше, чем в обычной проточной воде (в среднем на 13 %) (рис. 4,а). Последнее обстоятельство связано с упрочнением поверхности материала вследствие схлопывания вблизи нее кавитационных пузырьков, создающих в поверхностном слое остаточные сжимающие напряжения, повышающие усталостную прочность металлов [4].
3. Скорость докритического роста усталостной трещины в проточной воде выше, чем на воздухе, в среднем 1,5 раза. При этом, чем выше величина коэффициента интенсивности напряжений K_{\max} , тем указанное влияние меньше (рис. 4,б). Это связано с электрохимическими процессами, проходящими в вершине трещины, вследствие которых металл разъедается и подрастание трещины увеличивается.
4. Кавитирующая проточная вода вызывает еще большее увеличение скорости роста усталостной трещины (по сравнению некавитирующей водой в среднем в 2,5 раза), причем с увеличением K_{\max} это влияние ослабевает. Это объясняется, во-первых, интенсификацией в кавитирующей среде коррозионной активности последней, а, во-вторых, взаимным усилением коррозии и кавитационной эрозии материала [5]. Химическая коррозия в вершине трещины ускоряется за счет удаления из воды кислорода вследствие кавитационной дегазации, вызывающего образование окислой пленки, защищающей металл от дальнейшего разъедания. Кроме того, усиливается действие электрохимической коррозии в вершине трещины.

Заключение

Рассмотрено влияние НДС элементов конструкций их на эрозионную стойкость. Определено влияние кавитации на усталостное разрушение элементов конструкций. Комплексное исследование процессов эрозии и усталостного разрушения дает возможность учитывать их влияние при проектировании и изготовлении элементов конструкций, которые будут работать в кавитирующей жидкости, что, в свою очередь, позволяет увеличить срок эксплуатации таких элементов и конструкции в целом.

Библиографический список

1. Волков, В.М. Сопротивление элементов металлических конструкций кавитационному разрушению [Текст] / В.М. Волков, В.Ю. Шестоперов // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Алгоритмизация и автоматизация решения задач упругости и пластичности. Всесоюз. межвуз. сб. – Горький: ГПИ, 1982. С.51-59.
2. Шестоперов, В.Ю. Кавитационное разрушение материалов и критерии оценки их эрозионной стойкости [Текст] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №5 (102). С.79-83.
3. Шестоперов, В.Ю. Экспериментальное исследование кавитационной эрозии судостроительных материалов [Текст] // Теория и прочность ледокольного корабля. – Горький: ГПИ, 1980. С.57-60.
4. Волков, В.М. Механические свойства материалов: Учебное пособие [Текст] / В.М. Волков. – Горький: ГПИ, 1973. – 130 с.
5. Кнэпп, Р. Кавитация [Текст] / Кнэпп, Р., Дж. Дейт, Ф. Дж. Хэммит. – М.: Мир, 1974. – 687 с.