

УДК 620.193.16.004.624

**АНАЛИЗ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КАВИТАЦИИ
В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ И КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**ANALYSIS OF WEAR RESISTANCE OF MATERIALS UNDER CAVITATION
DEPENDING ON MECHANICAL AND KINETIC CHARACTERISTICS**

К.К. СЕЙТКАЗЕНОВА, Д.С. МЫРЗАЛИЕВ, К.Б. СУЕНДЫКОВА, М.М. АСЫЛБЕК, К.Е. ЕРГАЛИ
K.K. SEITKAZENOVA, D.S. MYRZALIYEV, K.B. SUENDYKOVA, M.M. ASYLBEK, K.E. YERGALI

(Южно-Казахстанский государственный университет им. М.Ауэзова, Республика Казахстан)

(South Kazakhstan State University named after M. Auezov, Republic of Kazakhstan)

E-mail: kseitkazi@mail.ru

В статье предложен метод анализа износостойкости материалов при кавитационном изнашивании. Выявлены критерии, определяющие сопротивление материалов кавитационно-эрозионному изнашиванию. Износ сопоставим с такими характеристиками, как твердость, запас пластичности, скорость изнашивания.

This paper proposes a method for analyzing the wear resistance of materials under cavitation wear. The criteria determining the resistance of materials to cavitation-erosion wear are revealed. Wear is comparable to such characteristics as hardness, plasticity reserve, wear rate.

Ключевые слова: износ, повреждаемость, критерии, аккумуляционный период, твердость, структура, энергия разрушения.

Keywords: wear, damage, criteria, accumulation period, hardness, structure, energy of destruction.

Отдельные детали и механизмы технологических машин в процессе эксплуатации изнашиваются под воздействием сил трения, нагрузок, условий работы и окружающей среды. Особенно большой износ имеют детали, работающие в непосредственном контакте с жидкостью или газами. К ним относятся детали насосов, центрифуги, трубопроводы, элементы рабочих органов промывочных машин, подшипники скольжения, зубья колес и другое оборудование, в котором происходит интенсивное движение одно- и многофазных жидких сред. Перепады давления в жидкостном потоке, обтекающем конструкции, приводят к возникновению газовых пузырьков в зоне относительного разрежения и их последующему взрывному схлопыванию с образованием ударной волны. Эта ударная волна и является основным действующим фактором кавитационного разрушения поверхностей. Такое разрушение нередко встречается в гидротурбинном и технологическом оборудовании. Кавитационный износ нарушает нормальную работу машины, ухудшает эксплуатационные показатели, снижает надежность машины, иногда делает невозможной дальнейшую работу машины. На интенсивность кавитационного разрушения влияют коррозионные и другие явления, однако механическое воздействие играет решающую роль. Кривая изнашивания, представленная на рис. 1, учитывает три кинетических стадии: I – накопление дефектов и повреждаемости (стадия повреждаемости или аккумуляционный период изнашивания); II – развитие трещин, приводящих к разрушению твердого тела; III – образование продуктов изнашивания в пределах деформированного слоя. За критерии износостойкости материалов при воздействии на них твердых абразивных частиц – при абразивной эрозии; ударных волн, капель и микроструек жидкости – при кавитационной эрозии, прини-

мают как в отдельности, так и в комплексах механические, физико-химические и другие свойства деформируемых объемов материалов, которые наилучшим образом противостоят разрушающему воздействию на них внешней среды [1], [2]. Это определение относится также и к долговечности материалов и деталей машин и механизмов, так как критическое число циклов нагружения или соответствующий период времени до разрушения определяются свойствами материалов.

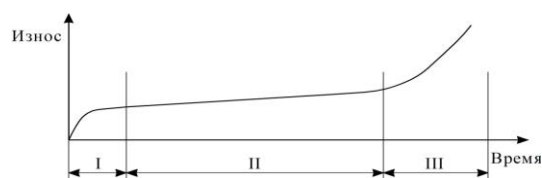


Рис. 1

Сопоставление износа ΔG (измеренного весовым методом) и аккумуляционного периода накопления внутренней энергии и повреждений $\tau_{ак}$ с легкоопределяемыми характеристиками изнашиваемых материалов – с твердостью (микротвердостью) HV и H_c , запасом пластичности $\epsilon_{кр}$, а также выявление корреляции между ΔG или скоростью изнашивания $v_{изн}$ и произведением $HV \cdot \tau_{ак}$ представляет интерес при выявлении критериев, определяющих сопротивление материалов кавитационно-эрозионному изнашиванию.

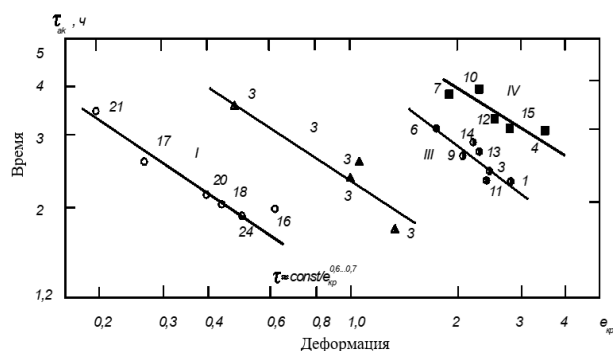


Рис. 2

Для выполнения поставленной задачи на магнитоэстрикционном вибраторе (МСВ) при $A=33$ мкм и $\omega=22$ кГц в пресной воде были испытаны две партии образцов, изготовленных из сталей различных классов и сплавов цветных металлов (рис. 2 – зависимость $\tau_{ак}$ от предельной пластичности сталей и сплавов цветных металлов $\epsilon_{кр}$ при испытании на МСВ при $A=33$ мкм, $\omega = 22$ кГц в пресной воде, где 21 – БрА9Ж4Н4Л; 17–67А5Мц2Ж2; 20 – Бр "Нева-70"; 18 – Бр "Куманал"; 24 – титановый сплав (4% Al);

16 – ЛЦ40Мц3Ж1; П–19 – Бр "Новостон" 5 – 08Х18Н10Т; 2 – 25Л; 8 – 110Г13Л; П – 6 – 0Х17Н3Г4Д2Т; 14 – Ст.45 (н.); 9 – 38ХГСМНДЛ; 13 – сталь 3 (н.); 3 – 08Х14НДЛ; 11 – сталь 3 (отжиг); 1 – Армко-железо; VI – 7 – 0Х16Н4Г9АДФ; 10 – сталь 40ХГМНДЛ; 12 – Ст.45 (отжиг); 15 – наплавка электродами марки ЭА-395/9; 4 – 08Х15Н4ДМЛ) и образцов из алюминиево-никелевой бронзы, нестабильной при циклической деформации (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Марка бронз	Содержание элементов, % по массе				Износ ΔG за 7,5 ч, мг	Аккумуляц. период $\tau_{ак}$, ч
		Cu	Al	Ni	Ti		
1	Бр А11Н	Основа	11,36	1,13	–	0,75	4,7
2	БрА15Н2Т	–"–	15,3	1,74	0,12	0,85	4,3
3	Бр А15НТ	–"–	15,3	1,13	0,12	0,40	4,4
4	БрА12Н3Т	–"–	11,7	3,3	0,10	0,40	4,4
5	БрА15Н4Т	–"–	15,0	3,5	0,09	0,40	5,4
6	БрА11Н2Т	–"–	11,1	2,3	0,12	0,35	5,0
7	Бр 14Н2Т	–"–	14,5	1,6	0,24	0,20	5,9
8	Бр А15Н2	–"–	15,3	2,14	–	1,80	3,7

При построении зависимостей $\tau_{ак}(\epsilon_{кр})$ произошло расслоение опытных точек на четыре частных кривых, соответствующих формуле:

$$\tau_{ак} = \text{const}_{\tau-10} / e^{0,5 \div 0,7} \quad (1)$$

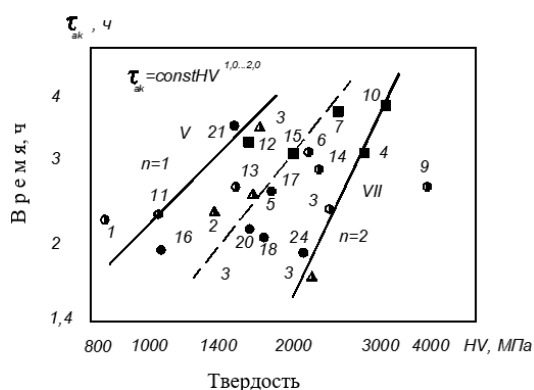


Рис. 3

Из (1) следует вывод о том, что с увеличением запаса пластичности продолжительность периода до начала интенсивного изнашивания материалов уменьшается, что означает соответствующее снижение их из-

носостойкости и долговечности. Результат (1) не согласуется с известным законом Коффина-Мансона для условий малоциклового усталости, в соответствии с которым между $\tau_{ак}$ и $\epsilon_{кр}$ должна иметь место прямая пропорциональность. В то же время, несмотря на значительный разброс опытных точек, между $\tau_{ак}$ и HV на рис. 3 (зависимость $\tau_{ак}$ от твердости сталей и сплавов цветных металлов; номера опытных точек такие же, как на рис. 2) в пределах поля, ограниченного линиями V и VII, просматриваются 2-3 частных зависимости, соответствующих общей формуле [3]:

$$\tau_{ак} = \text{const}_{11-13} \cdot HV^{1,0 \div 2,0} \quad (2)$$

При сопоставлении формулы (2) с экспериментальными данными, представленными в настоящей работе в виде зависимости износа от произведения $\tau_{ак} \cdot HV$, можно получить два частных результата:

- для металлов с пониженной и средней твердостью соответственно

$$\Delta G^{-1} \sim \tau_{ак} HV \sim HV \cdot HV \sim HV^2 \sim E_{уд}, \quad (3)$$

$$\Delta G^{-1} \sim (\tau_{ак} HV)^{1,5} \sim (HV^{1,5} \cdot HV)^{1,5} \sim HV^{3,75} \approx E_{уд}^2,$$

– для металлов с более высокой твердостью

$$\Delta G^{-1} \sim (\tau_{ак} HV)^2 \sim (HV^2 \cdot HV)^2 \sim HV^6 \sim E_{уд}^3. \quad (4)$$

Соотношения (3) и (4) характеризуют случаи поведения изнашиваемых слоев металлов и возможное при износе изменение структуры по глубине, то есть глубину пластически деформированной зоны, которая по современным физико-механическим моделям определяет масштабные уровни деформирования и последующего разрушения (изнашивания) материалов. Относя результаты (3) и (4) к обобщающим статистическим закономерностям эрозии, рассмотрим теперь поведение материалов, разделенных на четыре группы (рис. 3) в отдельности.

Зависимость $\tau_{ак}(HV)$ для сплавов цветных металлов, построенная на рис. 4-а (рис. 4 – зависимость $\tau_{ак}$ от твердости металлов: а – для кривой I; б – для II; г – для III и IV; в и д – $\tau_{ак}(H_{\mu})$, $\Delta G(H_{\mu})$ и $\Delta G(\tau_{ак})$] для бронзовых образцов, испытанных на МСВ) при $HV=1550$ МПа, имеет излом.

До излома $\tau_{ак}$ увеличивается пропорционально росту HV^2 . После излома, наоборот, увеличение твердости приводит к уменьшению $\tau_{ак}$. В общем случае опытные точки соответствуют зависимости:

$$\tau_{ак} = \text{const}_{14} HV^n, \quad (5)$$

где $n = 2$ при $HV \leq 1550$ МПа и $n = -2$ при $HV \geq 1550$ МПа.

Для нисходящих ветвей справедливо:

$$\tau_{ак} \sim HV^{-2} \text{ и } \Delta G^{-1} \sim \tau_{ак} HV \sim HV^{-1} \sim \tau_{ак}^{0,5} \approx E_{уд}. \quad (7)$$

Латунь ЛЦ40МцЗЖ1 на рис. 4-а имеет такой же аккумуляционный период, как у более твердой и более прочной Al–Ni бронзы.

Аналогично ведут себя материалы под номерами 19, 5,2 и 8 (рис. 4-б), так как для них зависимость $\tau_{ак}(HV)$ на рис. 4-а и 4-б можно записать через соотношения:

$$\tau_{ак} \sim HV^2 \text{ и } \Delta G^{-1} \sim \tau_{ак} HV \sim HV^3 \sim E_{уд}^{1,5}. \quad (6)$$

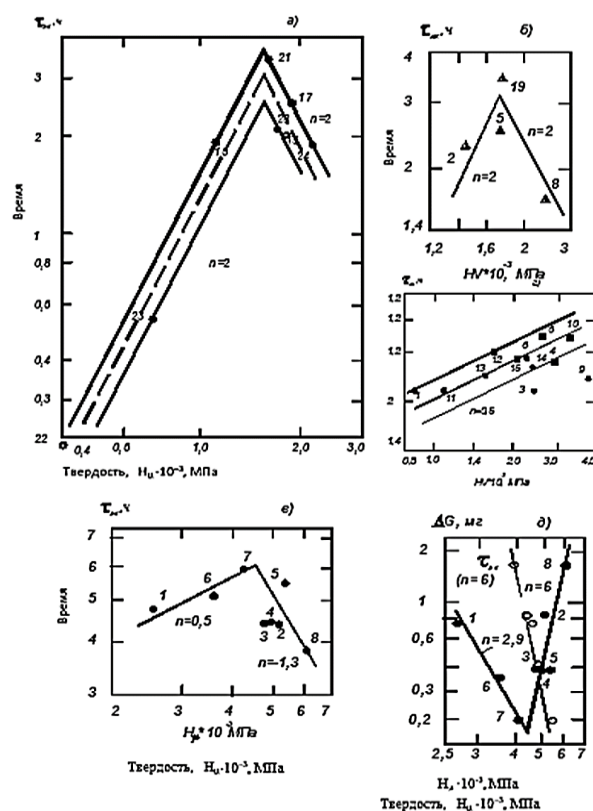


Рис. 4

щим влиянием интерметаллидов Cu_3Al , снижающих $\tau_{\text{ак}}$ бронз (№2, 3, 4 и 8), имеющих повышенную микротвердость.

Для образцов 1, 6 и 7, согласно рис. 4-в, справедливы соотношения:

$$\tau_{\text{ак}} \sim H_{\mu}^{0.5} \text{ и } \Delta G^{-1} \sim (\tau_{\text{ак}} H_{\mu})^2 \sim (H_{\mu}^{0.5} H_{\mu})^2 \sim H_{\mu}^3 \sim E_{\text{уд}}^{1.5}. \quad (8)$$

Вытекающие из (8) зависимости износоустойчивости бронз от H_{μ}^3 и от $\tau_{\text{ак}}^6$ имеют экспериментальное подтверждение (рис. 4-д) и соответствуют структурно-энергетической

теории изнашивания материалов.

Для бронзовых образцов под номерами 2...5 и 8 на рис. 4-в и 4-д можно записать:

$$\tau_{\text{ак}} \sim H_{\mu}^{-1.3} \text{ и } \Delta G^{-1} \sim (\tau_{\text{ак}} H_{\mu})^2 \sim H_{\mu}^{-0.6} \sim \tau_{\text{ак}}^{0.5} \approx E_{\text{уд}}. \quad (9)$$

Результат (9) характеризует поведение бронз после вязко-хрупкого перехода в область хрупкого разрушения тонких поверхностных слоев при сравнительно высоких значениях $\tau_{\text{ак}}$. Поэтому продолжительность $\tau_{\text{ак}}$ в значительной степени будет определяться концентрацией упругих напряжений и размером зоны пластической деформации при вершинах микротрещин.

Интенсивность вязко-хрупкого разрушения материалов при вибрационной кави-

тации будет определяться акустическим сопротивлением $(\rho c)_M^3$, то есть произведением плотности материалов на скорость звука или отношением $(\dot{u}/c)^{1.5}$, в которой \dot{u} – скорость колебательных движений частиц материала при прохождении упругой волны деформации через микроструктурные препятствия, например, через менее прочные границы зерен, где \dot{u} будет возрастать. Для этого случая запишем:

$$\Delta G \sim \left(\frac{\dot{u}}{c}\right)^n \sim \left(\frac{\dot{u}}{v_{\text{кр}}}\right)^n \sim \left(\frac{\sigma_b}{E}\right)^n \sim \left(\frac{HV}{E}\right)^n \sim \frac{1}{(\rho c)_M^3}, \quad (10)$$

где σ_b и E – предел прочности и модуль упругости изнашиваемого материала.

На основании опыта [6], [7] для материалов, претерпевающих при изнашивании упругопластические микродеформации, n в (10) равен 1,5, а при упругих микродеформациях и преимущественно хрупком разрушении $n=3,0$.

При условиях $\tau_{\text{ак}} \sim \vartheta_{\text{кр}}$ и $n=3,0$ из (10) получим частные соотношения:

$$\Delta G \sim 1/\tau_{\text{ак}}^6 \sim HV^6, \quad (11)$$

которые коррелируют с аналогичными опытными зависимостями на рис. 4-д.

В соотношениях типа (10) интегральную твердость материалов целесообразно представить в виде отношения твердости основы сплавов $H_{\text{осн}}$ к твердости приграничных объемов $H_{\text{гр}}$.

Тогда можно записать:

$$\Delta G \sim (H_{\text{осн}}/H_{\text{гр}} E)^3 \sim (H_{\text{осн}}/H_{\text{гр}} \rho c_M^2)^3 \sim (H_{\text{осн}}/\rho \vartheta_{\text{кр}} c_M c_M^2)^3. \quad (12)$$

Знаменатель соотношения (12) представляет собой критическую плотность потока мощности упругой деформации, про-

ходящего через границы зерен и поверхности раздела фаз с различающимися с основой акустическими сопротивлениями. Зна-

менатели последних членов правых частей соотношений (10) и (12) идентичны друг другу, что указывает на продуктивность структурно-энергетического подхода при анализе аномалий в поведении материалов с резко гетерогенными структурами при импульсном кавитационном воздействии.

$$\tau_{ак} \sim HV^{1/2} \text{ и } \Delta G^{-1} \sim (\tau_{ак} HV)^2 \sim \tau_{ак}^6 \sim HV^3 \sim E_{уд}^{3/2}. \quad (13)$$

Последние соотношения так же, как и все предыдущие, подтверждают эффективность структурно-энергетического подхода при анализе закономерностей кавитационно-эрозионного изнашивания широкого круга металлических материалов.

ВЫВОДЫ

1. Характерной особенностью кинетики кавитационно-эрозионного изнашивания большинства конструкционных материалов является наличие на графике зависимости износа ΔG от времени t (или от числа внешних динамических воздействий N), так называемого аккумуляционного периода $\tau_{ак}$, в течение которого износ отсутствует. Продолжительность $\tau_{ак}$ является важной характеристикой усталостной долговечности поверхностных слоев материалов. Она определяет характер кинетической кривой $\Delta G(t)$ и сопротивление материалов эрозии.

2. Комплексные исследования показали, что в качестве объективных критериев эрозионной стойкости материалов и покрытий можно использовать прочностные, энергетические, усталостные характеристики материалов: $p_{кр}$, $\vartheta_{кр}$, $E_{уд}$, $W_{кр}^*$, $N_{кр}$, $\tau_{ак}$, значения которых изменяются при масштабных переходах аналогично изменению соответствующих энергий активации ведущих процессов атомно-молекулярных перегруппировок, происходящих в деформируемых объемах материалов. На различных масштабных уровнях нагружения изменяются прочностные, пластические и физико-механические характеристики материалов.

Зависимость $\tau_{ак}(HV)$ для стальных образцов (рис.4-г) также вписывается в общую структурно-энергетическую модель кавитационно - эрозионного изнашивания материалов.

Для десяти исследованных марок сталей были получены следующие соотношения:

ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В., Харач Г.М. Развитие расчетного метода оценки износа деталей машин // Сб.: Исследование по триботехнике.-М.: Изд. НИИ информации по машиностроению. – 1975.
2. Hirth F.W., Speckhardt H. Einfluss verschiedener Parameter auf das Verhalten von Reindluminium Al99,5 bei Schwingung skavitation //Metall (W.Berlin). – 1976, №3.
3. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. – М.: Metallургия, 1984.
4. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н., Сейтказенова К.К., Родионов В.П. Структурно-энергетические модели повреждаемости материалов при эрозии и усталости с учетом масштабных эффектов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – М., 2001, №4.
5. Погодаев Л.И., Сейтказенова К.К., Суендыкова К.Б. Структурно - энергетическая модель кавитационной эрозии материалов // Мат. Межд. науч.-практ. конф.: Железнодорожный транспорт Казахстана: История и перспективы экономического роста. – Алматы, 2004.
6. Fleisher G., Gröger H., Thum H. Verschleiß and Zuverlässigkeit //VEB. Verlag Technik.–1980.
7. Аскаров М.А. Кавитационное разрушение металлов и полимеров. – Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1974.

REFERENCES

1. Kragel'skiy I.V., Kharach G.M. Razvitie raschetnogo metoda otsenki iznosa detaley mashin // Sb.: Issledovanie po tribotekhnike.–M.: Izd. NII informatsii po mashinostroeniyu. – 1975.
2. Hirth F.W., Speckhardt H. Einfluss verschiedener Parameter auf das Verhalten von Reindluminium Al99,5 bei Schwingung skavitation //Metall (W.Berlin). – 1976, №3.
3. Vladimirov V.I. Fizicheskaya priroda razrushe-niya metallov. – M.: Metallurgiya, 1984.
4. Pogodaev L.I., Kuz'min V.N., Seytkazanova K.K., Rodionov V.P. Strukturno-energeticheskie modeli povrezhdaemosti materialov pri erozii i ustalosti s uchetom masshtabnykh effektov // Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. – M., 2001, №4.

5. Pogodaev L.I., Seytkazanova K.K., Suendykova K.B. Strukturno - energeticheskaya model' kavitatsionnoy erozii materialov // Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf.: Zheleznodorozhnyy transport Kazakhstana: Istoriya i perspektivy ekonomicheskogo rosta. – Almaty, 2004.

6. Fleisher G., Gröger H., Thum H. Verschlei and Zuverlässigkeit //VEB. Verlag Technik.–1980.

7. Askarov M.A. Kavitatsionnoe razrushenie metallov i polimerov. – Tbilisi: Sabchota Sakartvelo, 1974.

Рекомендована кафедрой механики и машиностроения. Поступила 22.01.20.
