

14. Lavine, J. M. Role of Si-H and Si-H₂ in photoluminescence of porous Si [Text] / J. M. Lavine, P. S. Sawan, T. Y. Shieh, A. J. Bellezza // Applied Physics Letters. – 1993 – Vol. 62, Issue 10. – P. 1099–1101. doi: 10.1063/1.108754
15. Banerjee, S. Role of Hydrogen- and oxygen-terminated surfaces in the luminescence of porous silicon [Text] / S. Banerjee, K. L. Narasimhan, A. Sardesai // Physical Review B. – 1994 – Vol. 49, Issue 4. – P. 2915–2918. doi: 10.1103/physrevb.49.2915
16. Дружинін, А. О. Дослідження поверхонь мультикристалічних підкладок кремнію насичених воднем методами мас-спектроскопії [Текст] / А. О. Дружинін, В. Ю. Єрохов, Н. Н. Берченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 1, № 5(67). – С. 34–37. doi: 10.15587/1729-4061.2014.21053

Подано експериментальні дані про залежність ерозії поверхневих шарів легованих сталей від часу дії мікроударного навантаження, обумовленого кавітацією. Встановлено аналітичне співвідношення між стійкістю поверхневих шарів сталей до дії кавітації і їх мікротвердістю. Досліджено сталі, поверхневі шари яких модифіковано для підвищення їх стійкості різними способами. Показана можливість збільшення стійкості шляхом нанесення іонно-плазмового покриття на загартований шар

Ключеві слова: сталь, поверхневий шар, модифікація, ерозія, аналітичне співвідношення, стійкість, мікротвердість, покриття

Представлены экспериментальные данные о зависимости эрозии поверхностных слоев легированных сталей от времени микроударного нагружения, создаваемого кавитацией. Получено аналитическое соотношение между стойкостью поверхностных слоев стали к воздействию кавитации и их микротвердостью. Исследованы стали, поверхностные слои которых модифицированы различными способами с целью увеличения их стойкости. Показана возможность увеличения стойкости путем нанесения ионно-плазменного покрытия на закаленный слой

Ключевые слова: сталь, поверхностный слой, модификация, эрозия, аналитическое соотношение, стойкость, микротвердость, покрытие

УДК 621.793

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40196

ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ К ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТАЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАВИТАЦИИ

В. И. Коваленко

Научный сотрудник отдела*

E-mail: kartmazov@kipt.kharkov.ua

Л. И. Мартыненко

Заместитель начальника отдела*

E-mail: kartmazov@kipt.kharkov.ua

В. Г. Маринин

Кандидат физико-математических наук, доцент,
старший научный сотрудник*

E-mail: marinin@kipt.kharkov.ua

*Отдел интенсивных

вакуумно-плазменных технологий

Институт физики твердого тела,

материаловедения и технологий

Национальный научный центр

«Харьковский физико-технический институт»

ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108

1. Введение

Повышение надежности и долговечности деталей машин и механизмов связано в первую очередь с полным или частичным устранением износа, обусловленного различными видами воздействий, в частности, на их поверхностные слои. Одним из специфических видов воздействия являются микроудары, создаваемые кавитирующими полостями при работе оборудования в условиях развитой кавитации, а также быстролетающими каплями жидкости или твердыми частицами. Особенностью такого воздействия является высокая скорость нагружения, малая его продолжительность,

локальность и многократность. При этом в поверхностных слоях возникают напряжения, которые могут быть сравнимы с пределом прочности материала, сосредоточены в объемах, близких к размерам его структурных составляющих. В связи с отсутствием методов прогнозирования прочности (стойкости) материалов в условиях такого нагружения возникает необходимость в получении данных для всех применяемых в промышленности материалов, в том числе, с модифицированными различными способами поверхностными слоями для повышения их износостойкости. На практике это означает – определение наиболее эффективного метода упрочнения из числа известных: де-

формационного, химико-термического или нанесение защитных слоев (покрытий, наплавов и др.).

2. Анализ литературных данных и постановка задачи

Одной из первых публикаций по изучению эрозии широкого круга материалов является работа Муассона, опубликованная в 1937 году [1]. Результаты работ, выполненных к 1980 году, обобщены в монографиях [2–5]. В монографии [2] изложены результаты изучения эрозии различных материалов в США и странах Европы, в частности, в лаборатории материалов ВВС США. В работе [3] приведены данные по эрозии материалов в гидродинамических трубах, влияние кавитации на гидродинамические характеристики элементов конструкций различных гидромашин.

Рассмотрению вопросов, связанных с исследованием физической сущности ударного взаимодействия, посвящена работа [4], а в монографии [5] исследовано кавитационное разрушение некоторых сплавов. В этих работах содержится значительный фактический материал о физических процессах, протекающих при кавитации и столкновении быстролетающих твердых частиц и жидких капель с твердыми поверхностями. Однако с учетом времени, прошедшего с момента опубликования работ, а также различий в технологиях изготовления сталей в разных странах, неполной информации о параметрах приборов, устройств, используемых для исследований, и разработки новых материалов, способов повышения их прочности, возникает необходимость в проведении новых исследований.

3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является получение количественных данных о величине эрозионной стойкости в условиях воздействия кавитации поверхностных слоев сталей, легированных хромом, молибденом, ванадием и ее изменении при различных способах модификации поверхности.

Для достижения определенной цели были поставлены следующие задачи:

- получить образцы из сталей с немодифицированными и модифицированными поверхностными слоями;
- измерить зависимость величины эрозии (разрушения) поверхностных слоев легированных сталей от времени воздействия кавитации;
- определить стойкость образцов из сталей в условиях воздействия кавитации и установить их связь с микротвердостью.

4. Оборудование и методика экспериментальных исследований эрозии поверхностных слоев легированных сталей

Образцы для исследования эрозии при воздействии кавитации изготавливали из следующих сталей: 15X1M1Ф, 25X1MФ, 25X1M1Ф, 20X1M1ФТР, 15X11MФ, 15X12ВНМФ, 20X13. Образцы изготавливали

в форме дисков диаметром 18 мм, толщиной 3 мм, квадратов такой же толщины с длиной стороны 18 мм, а также в форме клина. Исследованы стали без обработки и после азотирования, закалки, нанесения покрытий, в частности вакуумно-дуговым методом.

Эрозионную стойкость образцов измеряли на установке, описанной более детально в работе [6]. Для создания кавитационной зоны использованы ультразвуковые волны. При этом сигнал от генератора подается на магнитоотрицательный преобразователь механически соединенный с концентратором экспоненциального профиля, что обеспечивает увеличение амплитуды колебаний торцевой поверхности концентратора до 30 ± 2 мкм при частоте 20 кГц. Под торцевой поверхностью концентратора, установленного в сосуде с водой, формируется зона с развитой кавитацией. Образец устанавливается на расстоянии 0,50 мм от поверхности концентратора. Эрозию образцов измеряли гравиметрическим методом. Точность измерения весовых потерь, обусловленных эрозией, равна $\pm 0,015$ мг. Измеряли зависимость потерь от времени воздействия кавитации, и по этим данным строили кинетические кривые разрушения материала образцов, для которых характерно наличие начального участка, когда разрушение мало, и участка с максимальной квазипостоянной скоростью. На квазилинейных участках кинетических кривых определяли скорости разрушения, а затем вычисляли стойкость стали (Z_L^h) по отношению к эталону ($V_э = 1$ мкм/ч).

Абразивный износ измеряли по схеме плоскость – диск. Диск изготавливали из материала с жестко закрепленными частицами абразива. Скорость движения поверхности диска, которая контактирует с плоскостью образца, равна 4,38 м/с при нагружении образца 2,2 Н. Измеряли весовые потери образца за фиксированный промежуток времени. Микротвердость (H_μ) образцов измеряли на приборе ПМТ-3. Химико-термическую обработку проводили в соответствии с рекомендациями, представленными в работе [7]. Закалку ТВЧ и нанесение покрытий электроискровым методом проводили на предприятии ОАО «Турбоатом». Нанесение ионно-плазменных покрытий на поверхность стальных образцов осуществляли с применением вакуумного дугового разряда (ВДР) и подачей на образец стационарного отрицательного потенциала на образце [8]. Структуру покрытий изучали на металлографических шлифах при помощи световой оптики.

5. Экспериментальные результаты исследования эрозии поверхностных слоев легированных сталей при воздействии кавитации

Данные по эрозии малолегированных сталей, в зависимости от времени действия кавитации, представлены в виде кинетических кривых на рис. 1.

Из кинетических кривых следует, что с увеличением количества углерода и других легирующих элементов возрастают стойкость сталей к воздействию кавитации и эффективность их азотирования. Для квазилинейных участков кинетических кривых (рис. 1) значения стойкости, вычисленные по отношению к эталону, приведены в табл. 1.

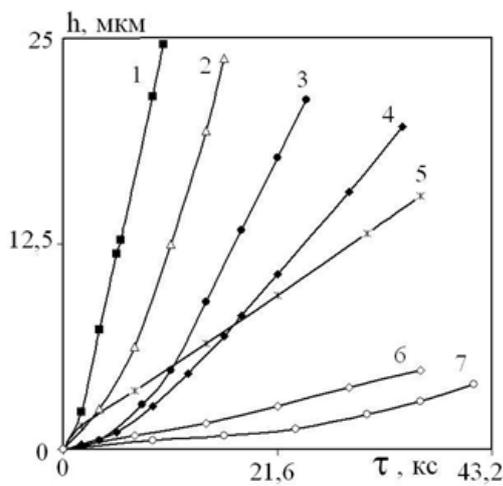


Рис. 1. Кинетические кривые разрушения неазотированных (1 – 4), ионно-имплантированных (5), и азотированных (6,7) сталей: 1 – 15X1M1Ф; 2 – 25X1MФ; 3 – 25X1M1Ф; 4 – 20X1M1ФТР; 5 – 15X1MФ; 6 – 20X1M1ФТР; 7 – 25X1M1Ф

Таблица 1

Стойкость стали к воздействию кавитации

Стойкость, микротвердость	Номер кривой						
	1	2	3	4	5	6	7
Z_L^h	0,108	0,143	0,238	0,416	1,1	1,96	1,89
H_{μ}	1,79	2,25	2,61	3,30	4,26	6,36	7,30

Анализ данных табл. 1 показывает, что с увеличением легирующих добавок возрастает не только стойкость, но и микротвердость стали. Видно также, что при ионной имплантации стойкость тоже возрастает, однако эффективность процесса невысока.

Кинетические кривые разрушения среднелегированных сталей при воздействии кавитационной зоны, создаваемой излучателем УЗК с амплитудой 20 и 30 мкм, приведены на рис. 2.

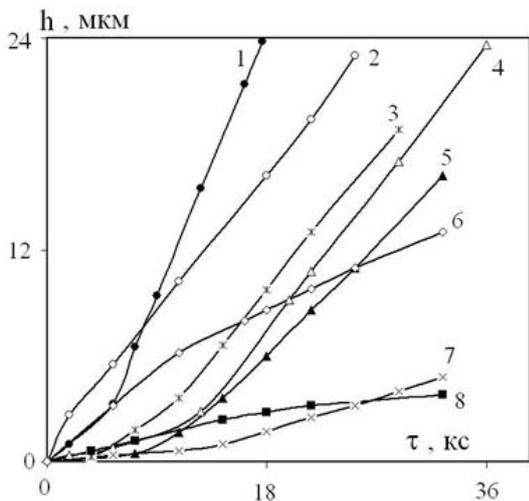


Рис. 2. Зависимость средней глубины разрушения (h) сталей 20X13 (1,3), 15X11MФ (2,4,5,7,8), 15X12ВНМФ (6) от времени воздействия кавитации (τ)

Образцы 1–5 исходные и только после полировки, 5 – амплитуда колебаний излучателя 20 мкм, 6 – после азотирования, 7 – после закалки, 8 – с электроискровым покрытием из сплава Т15К6

Данные рис. 2 показывают, что после азотирования, закалки, нанесения покрытий эрозия поверхностных слоев уменьшается по сравнению с разрушением образцов без термомеханической обработки. Так, при наклепе стали 20X13 с увеличением ее микротвердости в ~1,2 раза стойкость образцов к воздействию кавитации возрастает по отношению к эталону в ~1,7 раза, что подтверждает ранее полученные данные о влиянии холодной деформации на кавитационную стойкость стали [9]. В табл. 2 приведены конкретные значения стойкостей сталей по отношению к эталону, вычисленные для квазилинейных участков кинетических кривых, приведенных на рис. 2.

Анализ данных табл. 1, 2 показывает, что изменение стойкости сталей коррелирует с изменением их микротвердости. Для исследованных сталей эта взаимосвязь представлена на рис. 3, при этом белыми маркерами обозначены данные табл. 1, а черными – табл. 2.

Таблица 2

Кавитационная стойкость стали

Номер образца*	1	2	3	4	5	6	7	8
Z_L^{h**}	0,164	0,31	0,287	0,32	0,39	0,86	1,3	5

* – номер образца совпадает с номером кривой на рис. 2

** – стойкость по средней глубине разрушения (h) на квазилинейном участке (L) кинетической кривой.

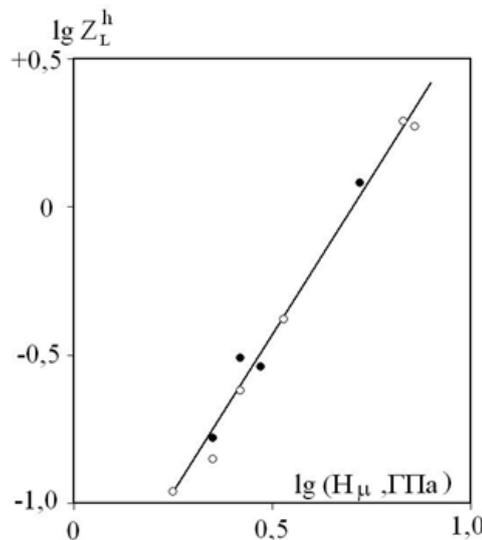


Рис. 3. Взаимосвязь между кавитационной стойкостью (Z_L^h) и микротвердостью малолегированных сталей H_{μ} . Черные маркеры – данные для сталей № 1, 2, 3, 7 табл. 2

Прямая на рис. 3 характеризует зависимость между Z_L^h и H_{μ} в виде соотношения $Z_L^h = 3,16 \cdot 10^{-2} H_{\mu}^{2,12}$ для малолегированных сталей. Зависимость близка к этой наблюдается для стали 15X11MФ с показателем степени 2,1, а для стали 20X13 – 2,25. Вычисленный коэффициент корреляции Пирсона для данных табл. 1

равен 0,9838. При этом для $t=3$ значение интеграла вероятности равно 0,9973, т.е. с такой вероятностью коэффициент корреляции в генеральной совокупности данных находится в интервале $0,9717 \leq r \leq 0,9959$ [10]. Полученные значения стойкости исследованных сталей после механической обработки оказывается невысокими, но существенно возрастает после закалки и нанесения покрытий на поверхность. Однако возможность их совместного применения с учетом различных методов формирования покрытий недостаточно изучена. Учитывая этот факт, нами проведено исследование влияния процесса формирования вакуумно-дугового нитрида титанового покрытия на приповерхностный слой стали, закаленный с использованием токов высокой частоты (ТВЧ). При этом исследованы структура, микротвердость и кавитационная стойкость закаленного слоя образца, имеющего клинообразную форму и изготовленного из стали 15X11МФ. На рис. 4 для этого образца приведены данные по изменению микротвердости вдоль расстояния (1) от острия клина до утолщенной его части в исходном состоянии и после нанесения покрытия.

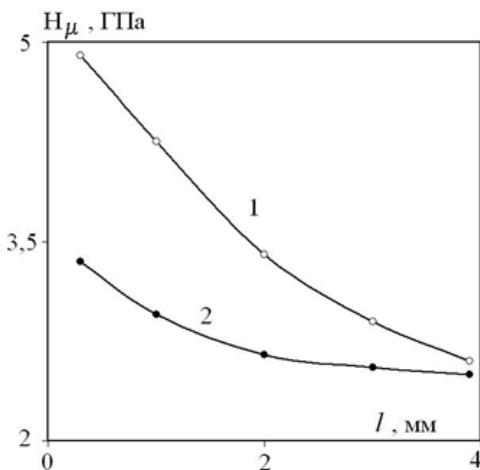


Рис. 4. Зависимость микротвердости от расстояния вдоль образца до (1) и после нанесения покрытия (2)

Данные рис. 4 показывают, что в процессе нанесения нитрида титанового покрытия происходит уменьшение микротвердости закаленной части образца на величину около 31 %, а той части, которая подвергалась только нагреву, на величину до 4 %, т.е. микротвердость практически приближается к величине, соответствующей исходной. Одновременно наблюдаются нагрев образца, температура которого определяется параметрами процесса формирования покрытия.

Проведенные измерения температуры и вычисления стойкости для квазилинейного участка кинетических кривых кавитационного разрушения образцов показали, что между этими величинами существует взаимосвязь (рис. 5).

Данные рис. 5 показывают, что стойкость закаленного слоя уменьшается при увеличении его температуры и при ее значении около 400 °С происходит практически полная потеря упрочняющих свойств, т.е. достигается стойкость незакаленного слоя.

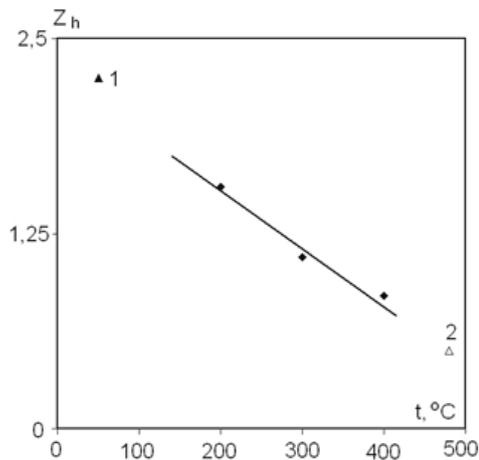


Рис. 5. Зависимость стойкости стали от температуры нанесения покрытия. 1 – стойкость закаленного слоя до нанесения покрытия; 2 – стойкость незакаленного слоя; 3 – изменение стойкости при изменении температуры

6. Обсуждение результатов исследований

Полученные данные по эрозии сталей, легированных хромом, ванадием, молибденом, имеют значительное практическое значение, в энергетическом машиностроении. Особенно это проявляется при эксплуатации энергетического оборудования на электрических станциях в условиях воздействия кавитации, что вызывает ускоренный износ его элементов. В результате износа возникает необходимость в более частом ремонте, увеличении затрат на замену оборудования, увеличение простоя оборудования, что снижает экономичность работы электростанций. При установлении мест существования кавитационных зон в паро-водяном тракте электростанций и полученных в данной работе значений по эрозии элементов тракта, изготовленных из малолегированных сталей, существует возможность упрочнения их поверхностей и, соответственно, значительного уменьшения эрозии и увеличения эксплуатационного ресурса.

Результаты исследований процесса эрозии и измерений ее величины позволяют получить взаимоотношения между стойкостью материала и измеренной микротвердостью его поверхностных слоев, что имеет важное практическое значение в условиях эксплуатации оборудования.

7. Выводы

1. Получены образцы из сталей с немодифицированными и модифицированными с закалкой поверхностных слоев и нанесением вакуумно-дугового покрытия. Измерена зависимость величины эрозии (разрушения) поверхностных слоев образцов легированных сталей от времени воздействия кавитации.

2. Определено, что при микроударном нагружении кавитацией поверхностных слоев малолегированных сталей, их стойкость взаимосвязана с микротвердостью в исследуемом интервале значений соотношением вида $Z_L^h = \alpha N^n$ при $n \approx 2,25$ для N в ГПа.

3. Установлено, что при наличии вакуумно-дугового покрытия, осажденного при соответствующих пара-

метрах проведения процесса, возможно получение на закаленном слое увеличения суммарной стойкости в 1,5...2 раза при воздействии кавитации.

Литература

1. Mousson, J. M. Pitting Resistance of Metals under cavitation conditions [Text] / J. M. Mousson // Trans.ASME. – 1937. – Vol. 59. – P. 399–408.
2. Спринджер, Дж. С. Эрозия при воздействии капель жидкости [Текст] / Дж. С. Спринджер; пер. с англ. С. В. Челомея. – М.: Машиностроение, 1981. – 200 с.
3. Кнапп, Т. R. Cavitation [Text] / T. R. Knapp, J. W. Daily, F. G. Hammit. – McGraw-Hill Book company, 1970. – 678 p.
4. Coroly, N. Erosion [Text] / N. Coroly. – Preecem N-Y, London, 1979. – 462 p.
5. Богачев, И. Н. Кавитационное разрушение и кавитационностойкие сплавы [Текст] / И. Н. Богачев. – Металлургия, 1972. – 189 с.
6. Коваленко, В. Ш. Обладнання для дослідження ерозії покриттів при мікро ударному діянні [Текст] / В. Ш. Коваленко, В. І. Коваленко, В. Г. Маринін // Вопросы атомной науки и техники. Серия ФРП и РМ. – 1998. – Вып. 5 (71). – С. 83–85.
7. Химико-термическая обработка металлов и сплавов [Текст]: справочник / под ред. Л. С. Ляховича. – М.: Metallurgy, 1981. – 420 с.
8. Аксёнов, И. И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы [Текст] / И. И. Аксёнов. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 212 с.
9. Маринін, В. Г. Кавітаційна тривкість холоднодеформованих сталей та міді [Текст] / В. Г. Маринін // ФХММ. – 2007. – № 3. – С. 89–92.
10. Касандрова, О. Н. Обработка результатов наблюдений [Текст] / О. Н. Касандрова, В. В. Лебедев. – М.: «Наука», 1970. – 230 с.

Проведено аналіз обертальних двовимірних коливань молекул води за допомогою моделі двохчастотного сферичного маятника. Визначено області існування еліпсоподібних траєкторій маятника. Показано, що для появи двовимірних еліпсоподібних обертань протонів навколо осей водневих зв'язків потрібна наявність спрямованого неоднорідного по кути поля сил міжмолекулярних взаємодій та кооперативних обертальних коливань

Ключеві слова: молекула води, двохчастотний сферичний маятник, неоднорідне поле сил, кооперативні коливання

Проведен анализ вращательных двумерных колебаний молекул воды с помощью модели двухчастотного сферического маятника. Определены области существования эллипсоподобных траекторий маятника. Показано, что для появления двумерных эллипсоподобных вращений протонов молекул воды вокруг своих осей водородных связей необходимо наличие направленного неоднородного по углу поля сил межмолекулярного взаимодействия и кооперативных вращательных колебаний

Ключевые слова: молекула воды, двухчастотный сферический маятник, неоднородное поле сил, кооперативные колебания

УДК 539.194: 544.273

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40569

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ МОЛЕКУЛ ВОДЫ

Н. Т. Малафаев

Кандидат физико-математических наук, доцент*

E-mail: mnt49@mail.ru

Н. И. Погожих

Доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой*

E-mail: drpogozhikh@mail.ru

*Кафедра энергетики и физики

Харьковский государственный университет

питания и торговли

ул. Клочковская, 333, г. Харьков, Украина, 61051

1. Введение

Свойства жидкой воды, подвижность ее молекул широко изучаются экспериментально, а также с помощью компьютерного моделирования методом молекулярной динамики и другими методами [1–7]. Хотя результаты моделирования статистически хорошо согласуются с

имеющимися свойствами воды, многие вопросы физики воды не изучены или требуют уточнения.

До сих пор до конца не ясна основная особенность поведения молекул в жидкой воде – причина изгибов водородных связей (Н – связей). Также не ясно, как статически или динамически изгибаются Н – связи и как при этом – хаотически или упорядоченно – совер-