

УДК 620.193.16

К. В. ВАКУЛЕНКО, И. В. БИБЛИК, И. Б. КАЗАК

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Украина

ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ СТАЛИ 20X13 С ПОКРЫТИЯМИ

Проведено исследование эрозионной стойкости образцов стали 20X13 с многослойными вакуумно-плазменными покрытиями трех различных составов. Определение результатов кавитационного воздействия на образцы с покрытиями и без покрытий осуществлялось по параметру весового износа; путем снятия профилограмм с поверхностей образцов, а также с помощью компьютерного моделирования эрозионных повреждений поверхности. Показано, что разработанная модель кавитационного разрушения, наряду с экспериментальными данными, может быть использована для вероятностного прогноза эрозионного износа конструкций на предполагаемый срок эксплуатации.

Ключевые слова: кавитационная эрозия, эрозионная стойкость, компьютерное моделирование, повреждения, многослойное покрытие.

1. Постановка задачи и методика исследования

Эрозия, возникающая при кавитации, происходит при взаимодействии материалов с быстрыми потоками жидкостей. Основной причиной разрушения вследствие кавитационной эрозии являются многократно повторяющиеся гидравлические удары, возникающие при «схлопывании» пузырьков, которые образуются вблизи поверхности твердого тела, омываемого потоком жидкости. Актуальным в настоящее время является изучение начальных процессов кавитационного изнашивания, установление закономерностей разрушения материалов с целью оценки их кавитационной стойкости и разработки рекомендаций по ее повышению.

Одним из признанных методов повышения эксплуатационных характеристик деталей машин в условиях кавитационной эрозии является применение защитных вакуумно-плазменных покрытий.

Цель настоящей работы состояла в исследовании влияния многослойных вакуумно-плазменных покрытий различных конструкций на эрозионную стойкость образцов из стали 20X13 в условиях кавитации.

Образцы в виде пластин квадратной формы (14×14×5 мм) из стали 20X13 подвергали следующей термообработке: нагрев до 1050 °С, выдержка 40 минут, закалка в масле + отпуск в течение двух часов при 700 °С с последующим охлаждением в воде.

После термообработки рабочие поверхности образцов шлифовывали и полировали. На подготовленную таким образом поверхность на установке

«Булат-6» наносили многослойные вакуумно-плазменные покрытия трех конструкций:

- покрытие на основе состава Cr+CrN;
- покрытие на основе состава Cr+αTi+TiN;
- покрытие на основе состава Cr+(TiCr)N.

Краткая характеристика покрытий приведена в табл. 1. В третьем столбце над чертой показана «конструкция» покрытия, а под чертой – задаваемая толщина отдельных слоев в микронах.

Таблица 1
Характеристика исследованных покрытий

№ покрытия	Толщина покрытия, мкм	Характеристика многослойности
1	8–10	$\frac{Cr+CrN}{(0,2+1,0) \times 10}$
2	10–12	$\frac{\alpha-Ti+TiN}{(0,2+1,0) \times 10}$
3	4–5	$\frac{Cr+(TiCr)N}{(0,1+0,5) \times 10}$

Кавитационному воздействию образцы подвергались на специальном стенде, включающем магнитоэлектрический вибратор с концентратором акустических колебаний, погруженный в ванну с водой. В ванне неподвижно закреплялся образец.

Определение результатов кавитационного воздействия на образцы с покрытиями и без покрытий осуществлялось несколькими методами: по параметру весового износа; путем снятия профилограмм с поверхностей образцов и последующего их анализа, а также с помощью компьютерного моделирования эрозионных повреждений поверхности.

Профилографирование осуществляли двумя методами: с помощью профилографа Surtronic 3⁺ и на

приборе микротвердости ПМТ-3 с использованием операции фокусирования.

2. Экспериментальные результаты

В результате кавитационного воздействия на рабочей поверхности образцов возникало эрозионное «пятно» диаметром около 5 мм.

Взвешивание образцов позволило получить кривые зависимости весового износа от времени кавитационного воздействия (рис. 1).

Как видно из рис. 1, для образцов из стали 20Х13 без покрытия процесс эрозионного изнашивания протекает в две стадии. Первая стадия длится 2 ч и соответствует невысокой скорости изнашивания 0,11 мг/ч, затем наступает вторая стадия, на которой скорость изнашивания увеличивается до 0,55 мг/ч и остается постоянной.

Считается, что на первой стадии происходит накопление внутренних дефектов металла, поэтому скорость изнашивания на второй стадии является собственно характеристикой его эрозионной стойкости.

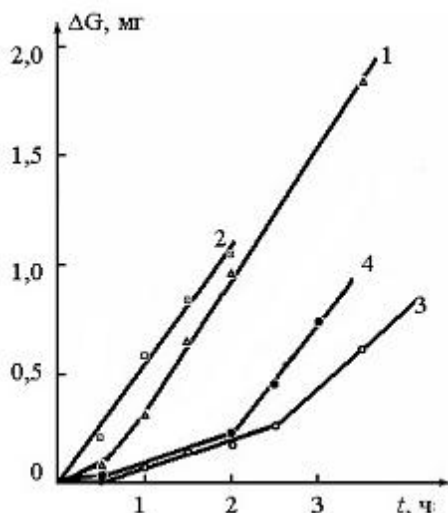


Рис. 1. Зависимости весового износа образцов от времени кавитационного воздействия: 1 – покрытие №1; 2 – покрытие №2; 3 – покрытие №3; 4 – образец без покрытия

Для образца с покрытием № 1 первая стадия длится всего 0,5 ч, а скорость изнашивания на второй стадии составляет 0,58 мг/ч. У образца с покрытием № 2 первая стадия изнашивания отсутствует, наблюдается постоянная скорость износа 0,42 мг/ч.

Образец с покрытием № 3 изнашивается со скоростью 0,1 мг/ч на протяжении 2,5 ч на первой стадии, и со скоростью 0,35 мг/ч – на второй.

Как метод оценки эрозионной стойкости покрытий, метод весового износа имеет существенный недостаток. Являясь характеристикой интегральной, весовой износ суммирует повреждения в пределах

всего кавитационного «пятна». Однако при визуальном обследовании «пятен» можно установить, что скорость изнашивания поверхности в различных областях разная и отличается для разных покрытий.

Общей для всех исследованных образцов является следующая особенность. В пределах образовавшегося «пятна» эрозионного разрушения можно выделить три характерные области. Во-первых, это область, в которой наблюдаются наиболее сильные разрушения поверхности – зона I. Следующая область соответствует умеренным разрушениям и представляет собой кольцевую площадку по краю «пятна» – зона II. И, наконец, область, лежащая между зонами I и II и соответствующая наименьшим разрушениям, – зона III. Общая схема распределения зон в пределах кавитационного «пятна» представлена на рис. 2.

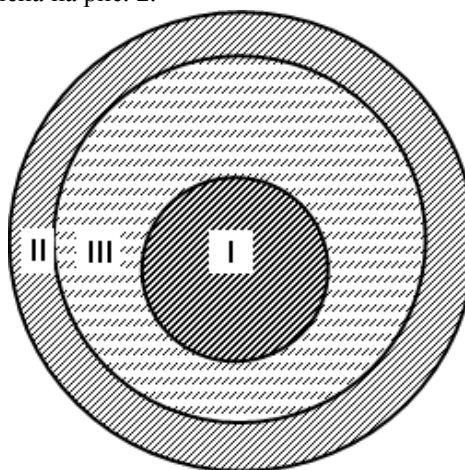


Рис. 2. Схематическое изображение «пятна» кавитации с зонами износа

Кроме оценки весового износа исследованных образцов в процессе кавитационной эрозии было проведено профилографирование эрозионных «пятен» вдоль их диаметров. Анализ профилограмм позволил получить оценку износа поверхностей образцов в пределах отдельных зон путем вычисления объемов изношенного материала. Результаты сравнения профилей с учетом предположения, что износ в любой точке кавитационного «пятна» пропорционален энергии воздействия кавитации на материал в этой точке, были использованы для построения нормированных кривых удельных энергий, которые подводятся к образцу при кавитации.

3. Результаты компьютерного моделирования

Компьютерное моделирование эрозионного износа исследованных образцов преследовало следующие цели:

- разработать и реализовать алгоритм для проведения

вычислительных экспериментов по решению задач изучения и прогнозирования кавитационной эрозии;

- исследовать адекватность результатов компьютерного моделирования, получаемых с помощью разработанного алгоритма, экспериментальным данным.

Для процессов эрозионного изнашивания характерна пространственно-временная неоднородность [1]. Пространственная неоднородность проявляется в переменности местной интенсивности разрушения и характеристик рельефа эродированных поверхностей в пределах зон эрозии, временная – в существовании чередующихся во времени периодов различной интенсивности повреждения. Существенное влияние на кинетику эрозии в процессе эрозионного изнашивания оказывает также неоднородность микроструктуры материалов. Поэтому для достижения необходимого уровня достоверности модели необходимо в ходе имитационного моделирования учитывать статистический характер эрозии.

Компьютерное моделирование эрозионных повреждений поверхности исследованных образцов проводилось в рамках специального расчетно-экспериментального метода (РЭМ) [2], основанного на компьютерном моделировании процесса разрушения конструкционных материалов.

В основу разработанной в настоящей работе модели кавитационного износа положены представления о рассеянии механических характеристик материалов и о статистической природе их разрушения – свойствах, которые должны наиболее полно проявляться при эрозионном разрушении.

Кавитационная эрозия рассматривается как усталостный случайный процесс [3,4], при котором за фиксированный временной интервал локальные микрообъемы материала поверхностного слоя материала испытывают случайное по величине эрозионно-усталостное повреждение со стороны потока. Оно вызывает необратимое возрастание суммарного уровня их поврежденности и нарушение сплошности при достижении предельного значения.

Как было показано ранее [2], компьютерная модель материала, создаваемая в рамках РЭМ, в принципе позволяет учесть все возможные виды повреждений. При этом возможно как «статическое» моделирование (предварительно выявленные повреждения вносятся в модель материала), так и «динамическое», когда структурному элементу изначально ставится в соответствие набор характеристик различных свойств, например, предельная деформационная способность, сопротивление коррозионному растрескиванию, сопротивление эрозионному разрушению и т.д.

Для целей настоящей работы модель материала в рамках РЭМ создавалась таким образом, чтобы в

результате имитационного компьютерного моделирования процесса кавитационной эрозии можно было получить эрозионный рельеф, совпадающий с полученными профилограммами поверхности исследованных образцов.

На рис. 3 в качестве примера приведен эрозионный рельеф, полученный в результате компьютерного моделирования эрозионного износа образца стали 20X13 без покрытия.

Для исследований эрозионного износа образцов в качестве критериев в данной работе были использованы максимальная глубина кавитационной эрозии в зоне I, а также максимальные глубины остальных зон эрозии.

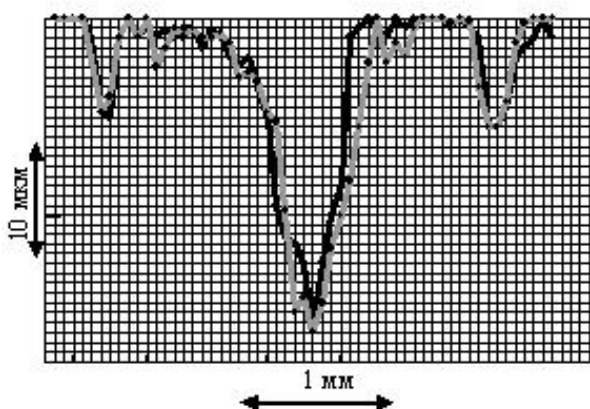


Рис. 3. Сравнение эрозионного «рельефа», полученного с помощью компьютерного моделирования (черный цвет) и профилограммы (серый цвет) образца стали 20X13 без покрытия

Результатом компьютерного моделирования эрозионного износа является определение и визуализация текущего эрозионного состояния исследованных образцов в виде глубины эрозионных разрушений поверхности и накопленного усталостного повреждения.

В табл. 2 приведены значения скоростей эрозионного износа (которые определялись по изменению во времени числа разрушенных структурных элементов) на 1-й и 2-й стадии, полученные в результате компьютерного моделирования, и проведено их сравнение с экспериментальными результатами. Видно, что результаты для всех исследованных образцов практически совпадают.

На рис. 4 в качестве примера приведено распределение глубин эрозионных разрушений поверхности образца с покрытием № 3 для трех значений времени кавитационного воздействия (после 1 ч, 2-х и 3-х ч). Распределение было получено в результате компьютерного моделирования, на приведенных гистограммах глубина эрозионных разрушений поверхности определялась числом разрушенных структурных элементов (m – количество эрозионных разрушений определенной глубины).

Анализ динамики изменения распределений эрозионной повреждаемости для всех исследованных образцов свидетельствует о том, что для начальной стадии эрозионного износа (1 ч кавитационного воздействия) характерно наличие разрушений минимальной глубины (1-2 структурных элемента). После двух часов воздействия распределение смещается в область средних глубин (6-8 структурных элементов) и после трех часов воздействия максимальная глубина эрозионных разрушений составляет 25-50 структурных элементов в зависимости от материала покрытия.

Таблица 2
Сравнение характеристик износа образцов, полученных весовым методом, с результатами компьютерного моделирования

Образцы	Результаты, полученные весовым методом		Результаты, полученные компьютерным моделированием	
	Скорость износа на 1-й стадии, мг/ч	Скорость износа на 2-й стадии, мг/ч	Скорость износа на 1-й стадии	Скорость износа на 2-й стадии
без покрытия	0,11	0,55	0,126	0,50
с покрытием №1	0,2	0,58	0,2	0,55
с покрытием №2	–	0,42	–	0,40
с покрытием №3	0,1	0,35	0,094	0,38

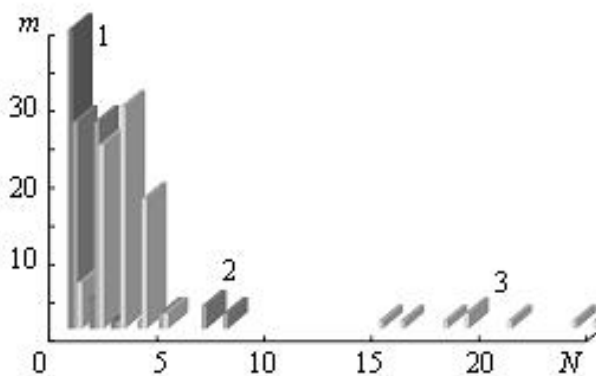


Рис. 4. Распределение глубин эрозионных разрушений (N – число разрушенных структурных элементов) образца стали 20X13 с покрытием №3 для трех значений времени кавитационного воздействия: 1 – 1 ч; 2 – 2 ч; 3 – 3 ч

Гистограммы, аналогичные приведенной на рис. 4, могут быть получены для любого момента времени кавитационного воздействия с определением максимальной и средней глубины эрозионных разрушений поверхности образцов.

Таким образом, показатели процесса развития во времени эрозионных разрушений поверхности

могут быть использованы для прогнозирования времени достижения предельно допустимой глубины, а, следовательно, и для оценки показателей надежности конструкций, работающих в условиях кавитационных воздействий.

На рис. 5 приведены расчетные зависимости, отражающие кинетику развития эрозионных повреждений поверхности исследованных образцов в зоне I (см. рис. 2). Глубина эрозионных разрушений поверхности определялась как количество разрушенных структурных элементов (N) компьютерной модели материала.

Видно, что образцы из стали 20X13 с покрытием №3 характеризуются наименьшими разрушениями в этой зоне, равно как и наименьшей скоростью их развития во времени. Наибольшие разрушения в зоне I наблюдаются для образцов с покрытием №1, затем – для образцов из стали 20X13 без покрытия и для образцов с покрытием №2. Полученные результаты согласуются с зависимостями весового износа (см. рис. 1), а также с выводами, вытекающими из анализа профилограмм исследованных образцов.

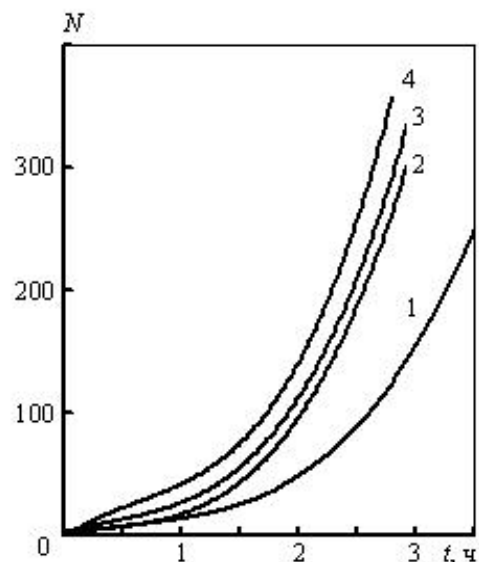


Рис. 5. Кинетика накопления эрозионных разрушений в зоне I кавитационного «пятна» образцов: 1 – с покрытием №3; 2 – с покрытием №2; 3 – без покрытия; 4 – с покрытием №1

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что наиболее важными преимуществами компьютерного моделирования эрозионных разрушений поверхности исследуемых образцов являются возможность проведения анализа с целью оценки параметров зоны эрозионных разрушений, а также визуализация результатов. Кроме того, на основании прогнозных оценок изменения во времени максимальной глубины эрозионных разрушений возможно определять наступление момента опасной или недопустимой эксплуатации исследуемого объекта.

Выводы

Приведены результаты количественной оценки параметров процессов, протекающих в материале исследованных образцов при кавитационном воздействии. Показано, что наибольшей стойкостью к кавитационному воздействию обладает покрытие на основе состава Cr+(TiCr)N, которое позволяет снизить скорость эрозии образцов почти в 2 раза.

Расчетные исследования, выполненные с помощью компьютерного моделирования эрозионных разрушений поверхности исследованных образцов, показали хорошее совпадение с экспериментальными результатами.

Разработана модель кавитационного разрушения, которая, наряду с экспериментальными данными, может быть использована для вероятностного прогнозирования эрозионного износа на предполагаемый срок службы элементов конструкций, работающих в условиях кавитации.

Литература

1. Лагерев, А. В. Эрозия паровых турбин: вероятностный подход [Текст] : моногр. В 3 т. Вероятностное прогнозирование эрозии паровых турбин: т. 2 / А. В. Лагерев. – М. : Машиностроение-1, 2006. – 295 с.

2. Милешкин, М. Б. Новый метод исследования особенностей механического поведения материалов и оценки прочностной надежности элементов конструкций [Текст] / М. Б. Милешкин, И. В. Библик // Надежность и долговечность машин и сооружений : Междунар. науч.-техн. сб. ИПП НАН Украины. – К., 2006. – Вып. 26. – С. 302-310.

3. Зносостійкість сплавів, відновлення та зміцнення деталей машин [Текст] / ред. В. С. Попова. – Запоріжжя : Вид-во ВАТ «Мотор Січ», 2006. – 420 с.

4. Дергачев, К. В. Особенности разработки и программной реализации имитационной модели эрозионного изнашивания рабочих лопаток мощных влажно-паровых турбин [Текст] / К. В. Дергачев, Д. А. Коростелев // Вестник Брянск. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 4(20). – С. 49-57.

Поступила в редакцию 1.06.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. отделом нестационарных механических процессов Ю. С. Воробьев, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ПОВЕРХНІ ПРИ КАВІТАЦІЙНІЙ ЕРОЗІЇ СТАЛІ 20X13 З ПОКРИТТЯМИ

К. В. Вакулєнко, І. В. Біблік, І. Б. Казак

Проведено дослідження ерозійної стійкості сталі 20X13 з багатошаровими вакуумно-плазмовими покриттями трьох різних складів. Визначення результатів кавітаційного впливу на зразки з покриттями і без покриттів здійснювалося за параметром вагового зносу, шляхом зняття профілограм з поверхонь зразків, а також за допомогою комп'ютерного моделювання ерозійних пошкоджень поверхні. Показано, що розроблена модель кавітаційного руйнування, поряд з експериментальними даними, може бути використана для імовірнісного прогнозу ерозійного зносу конструкцій на передбачуваний термін експлуатації.

Ключові слова: кавітаційна ерозія, ерозійна стійкість, комп'ютерне моделювання, пошкодження, багатошарове покриття.

SURFACE DAMAGEABILITY DURING THE CAVITATIONAL EROSION OF STEEL 20X13 WITH COATINGS

K. V. Vakulenko, I. V. Biblik, I. B. Kazak

A study of erosion resistance of steel 20X13 with multilayer vacuum-plasma coatings of three different compositions is carried out. Determination of results of cavitation exposure on the samples with and without coatings is carried out by the weight wear; by UN-profile diagrams from the surfaces of the samples, as well as using computer simulation of surface erosion damages. It is shown that the developed model of the cavitation fracture along with experimental data, can be used to make probabilistic prediction of erosive wear of designs on their expected life.

Key words: cavitation erosion, erosion resistance, computer simulation, damages, multilayer coating.

Вакулєнко Карина Владимировна – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., и. о. зав. отделом материаловедения, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: matsevslad@ipmach.kharkov.ua.

Біблік Ирина Валентиновна – Главный инженер-исследователь отдела материаловедения, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: miles@ipmach.kharkov.ua.

Казак Ирина Богдановна – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ст. науч. сотр., Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина, e-mail: matsevslad@ipmach.kharkov.ua.