

## Компьютерное моделирование кавитационной эрозии стали 20X13 с покрытиями

*Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины*

Представлены результаты компьютерного моделирования эрозионных разрушений поверхностных слоев образцов стали 20X13 с двумя видами покрытий в зависимости от времени микроударного нагружения, создаваемого кавитацией. Разработаны модель кавитационного разрушения и алгоритм расчета для количественной оценки параметров процессов, протекающих в материале исследованных образцов при кавитационном воздействии. Получено хорошее соответствие результатов компьютерного моделирования эрозионных разрушений поверхности экспериментальным данным. Показано, что наилучшей эрозионной стойкостью обладают образцы стали 20X13 с вакуумно-плазменным покрытием  $\alpha$ -Ti+TiN.

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

### Введение

Кавитация как явление, связанное с разрывом сплошности движущейся жидкости, образованием в ней вакуумных пустот (каверн) и последующим их смыканием, сопровождаемых большими гидродинамическими ударами, известна давно и до настоящего времени представляет собой одну из серьезных проблем, связанную со значительными разрушениями лопастей гидравлических турбин, гребных винтов, лопаток авиационных двигателей, паровых и газовых турбин.

Классически под эрозией понимают последовательное разрушение поверхностных слоев изделий или деталей в потоке газа или жидкости под влиянием различных механических, термических и электрических воздействий [1].

Актуальным в настоящее время является изучение начальных процессов кавитационного изнашивания, установление закономерностей разрушения материалов в целях оценки их кавитационной стойкости и разработки рекомендаций по ее повышению.

Предотвратить или замедлить разрушение поверхностей твердых тел в условиях кавитации можно путем повышения эрозионной стойкости материала с помощью различных упрочняющих обработок, приводящих к изменению химического состава, структуры и шероховатости поверхности, а также созданием на поверхности изделий защитных пленок и покрытий.

Поскольку одним из признанных методов повышения эксплуатационных характеристик деталей машин в условиях кавитационной эрозии является применение защитных вакуумно-плазменных покрытий, в настоящей работе проведено исследование влияния многослойных вакуумно-плазменных покрытий на эрозионную стойкость образцов из стали 20X13 в условиях кавитации.

Целью работы являлась разработка алгоритма для компьютерного моделирования кинетического процесса накопления кавитационно-эрозионных повреждений и их пространственно-временной эволюции на основе экспериментальных данных [2].

## 1. Постановка задачи

Одним из подходов к решению проблемы кавитационных разрушений поверхности материалов является использование качественных полуэмпирических моделей изменения состояния материала под действием множественных, случайным образом прикладываемых к поверхности микроимпульсов нагружения.

Для процессов эрозионного изнашивания (ЭИ) характерна пространственно-временная и режимная неоднородность [3]. Пространственная неоднородность проявляется в переменной местной интенсивности разрушения и характеристик рельефа эродированных поверхностей в пределах зон эрозии, временная – в существовании чередующихся во времени периодов различной интенсивности повреждения, режимная – в неодинаковой эрозионной опасности возможных режимов эксплуатации конструкций. Существенное влияние на кинетику эрозии в процессе эрозионного изнашивания оказывает также неоднородность микроструктуры материалов. Поэтому для достижения приемлемого уровня достоверности модели необходимо в ходе компьютерного моделирования, прежде всего, учитывать статистический характер эрозии [4].

Современные методы расчета ЭИ являются преимущественно детерминированными и не могут отразить наблюдаемые индивидуальные различия в кинетике износа однотипных изделий, а также особенности конструкции и режимов работы диагностируемого оборудования. Однако эти различия подлежат учету, так как не средний уровень износа, а максимально возможные отклонения от него определяют показатели эрозионной надежности. Их учет возможен при использовании в качестве алгоритмического обеспечения вероятностно-статистических методов анализа и прогнозирования эрозии.

## 2. Алгоритм расчета

Для прогнозирования разрушения поверхности материалов в результате кавитационного воздействия главный интерес представляет пространственное распределение элементарных повреждений. Поскольку случайный процесс накопления повреждений является стохастическим, нелинейным и необратимым, в качестве адекватной модели для описания этого процесса может быть рассмотрена модель материала, создаваемая в рамках специального расчетно-экспериментального метода (РЭМ) [5], основанного на компьютерном моделировании процесса разрушения материалов и элементов конструкций. В основу разработанной для целей настоящей работы 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.

При компьютерном моделировании кавитационных разрушений поверхности материала кавитационная эрозия рассматривается как усталостный случайный процесс, при котором за фиксированный временной интервал локальные микрообъемы 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.

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 профилограммами поверхности исследованных образцов, приведенными в работе [2].

При построении имитационной модели кавитационной эрозии поверхностный слой материала представлялся массивом структурных элементов, каждый из которых характеризуется конкретной эрозионной стойкостью. При этом допускалось, что координата возникновения дефекта на поверхности материала – случайная, равномерно распределенная величина.

Процесс накопления повреждений в поверхностном слое материала рассматривался как процесс продолжительного накопления малых рассеянных дефектов (повреждений) с последующим их объединением. Моделирование воздействия кавитации проводилось на площадках малого размера, представляющих различные участки поверхности. Площадка разбивалась на структурные элементы, в пределах каждого из которых характеристики деформации поверхности считались постоянными. В процессе моделирования рассматривалось воздействие импульсов давления на структурные элементы площадки, координаты которых выбирались случайным образом с помощью генератора случайных чисел.

Для пространственной дискретизации эродирующая поверхность представлялась конечным двумерным множеством микроплощадок. В каждой микроплощадке фиксировалась расчетная точка, характеристики износа в которой считались присущими всей поверхности микроплощадки.

Разработанный алгоритм позволил естественным образом ввести в расчетные соотношения статистическую неоднородность микроструктуры и эрозионно-усталостных свойств микрообъемов поверхностного слоя материала.

### **3. Результаты компьютерного моделирования эрозионных разрушений**

Исследование проведено на образцах стали 20X13 без покрытия и на образцах стали 20X13 с многослойными вакуумно-плазменными покрытиями двух конструкций:

- покрытие на основе состава Cr+CrN;
- покрытие на основе состава  $\alpha$ Ti+TiN.

Толщина покрытий составляла 10 мкм.

Результатом компьютерного моделирования эрозионного износа является определение и визуализация текущего эрозионного состояния исследованных образцов в виде глубины эрозионных разрушений, а также динамика изменения распределения повреждаемости поверхности фракталами, состоящими из разрушенных структурных элементов разной длины.

На рис. 1–3 показаны гистограммы распределения глубин эрозионных разрушений поверхности исследованных образцов для трех значений времени кавитационного воздействия (1 – после одного часа, 2 – после двух часов и 3 – после трех часов). На приведенных гистограммах глубина эрозионных разрушений поверхности определялась числом разрушенных структурных элементов  $N$ ,  $m$  – количество эрозионных разрушений определенной глубины.

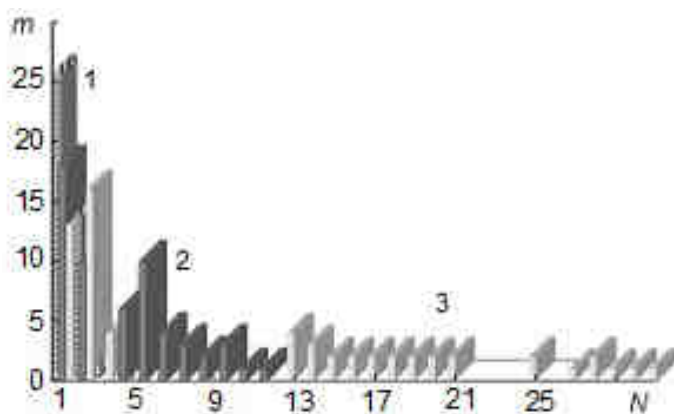


Рис. 1. Распределение эрозионных разрушений в образце стали 20X13

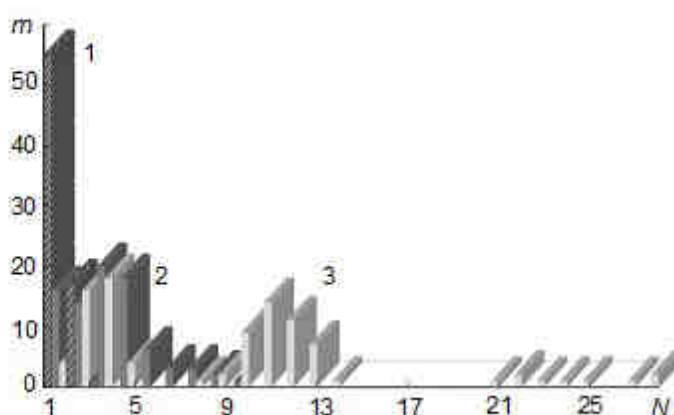


Рис. 2. Распределение эрозионных разрушений в образце стали 20X13 с покрытием Cr+CrN

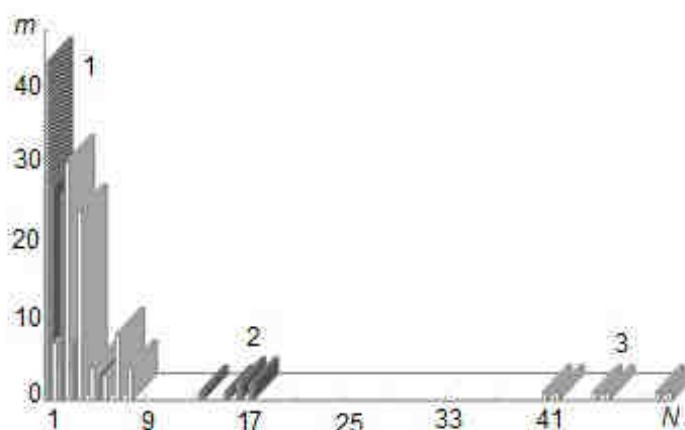


Рис. 3. Распределение эрозионных разрушений в образце стали 20X13 с покрытием  $\alpha$ Ti+TiN

На рис. 4 изображена гистограмма эрозионных разрушений поверхности всех исследованных образцов после трех часов воздействия (3 – образец без покрытия, 2 – покрытие Cr+CrN, 1 – покрытие  $\alpha$ Ti+TiN).

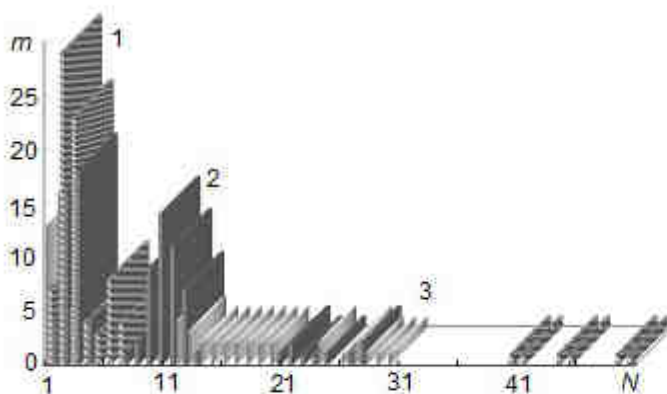


Рис. 4. Распределение эрозионных разрушений исследованных образцов после трех часов воздействия

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 (отдельные структурные элементы). После двух часов воздействия распределение смещается в область средних глубин (образование фракталов с размерами 6–8 структурных элементов) и после трех часов воздействия максимальная глубина эрозионных разрушений (максимальный размер фракталов) составляет 25–50 структурных элементов в зависимости от материала покрытия.

Гистограммы, аналогичные показанным на рис. 1–3, могут быть получены для любого момента времени кавитационного воздействия с определением максимальной и средней глубины эрозионных разрушений поверхности образцов.

На рис. 5 изображены зависимости максимальной глубины эрозионных разрушений поверхности исследованных образцов от времени.

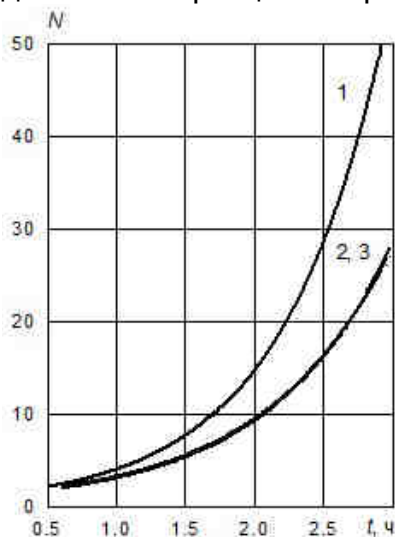


Рис. 5. Зависимости максимальной глубины эрозионных разрушений от времени

Видно, что кривые 2 (образец без покрытия) и 3 (образец с покрытием Cr+CrN) практически совпадают, в то время как для образцов с покрытием  $\alpha$ Ti+TiN (кривая 1) зависимости существенно различаются. Это свидетельствует о том,

что, по-видимому, максимальная глубина эрозионных разрушений наряду с другими характеристиками процесса кавитационной эрозии должна использоваться для прогнозирования времени достижения предельно допустимой глубины, а, следовательно, и для оценки показателей надежности конструкций, работающих в условиях кавитационных воздействий.

Результаты компьютерного моделирования эрозионного износа могут использоваться также для решения обратных задач, связанных с выявлением эрозионно-усталостных свойств материалов путем интерпретации данных об уровне эрозионного износа, полученных в ходе экспериментальных исследований. Необходимость решения обратных задач может возникнуть в таких случаях:

- когда необходимо определить эрозионно-усталостные свойства новых материалов;
- следует уточнить эрозионно-усталостные свойства для уже известных материалов и защитных покрытий;
- необходимо уточнить эрозионно-усталостные свойства материала конкретного элемента конструкции в целях применения полученной информации при дальнейшем моделировании эрозионного износа этого же конструкционного элемента после окончания восстановительного ремонта.

### **Выводы**

На основе специального РЭМ разработана модель кавитационного разрушения и алгоритм расчета для количественной оценки параметров процессов, протекающих в материале исследованных образцов при кавитационном воздействии.

Результаты компьютерного моделирования эрозионных разрушений поверхностных слоев образцов стали 20Х13 с двумя видами покрытий от времени микроударного нагружения, создаваемого кавитацией, показали хорошее соответствие с экспериментальными результатами. Среди исследованных образцов наилучшей эрозионной стойкостью обладают образцы стали 20Х13 с вакуумно-плазменным покрытием  $\alpha$ -Ti+TiN.

Разработанная модель кавитационного разрушения и алгоритм расчета наряду с экспериментальными данными могут быть использованы для вероятностного прогнозирования влияния эрозионного износа на предполагаемый срок службы элементов конструкций, работающих в условиях кавитации, и определения наступления момента опасной или недопустимой эксплуатации исследуемого оборудования.

Полученные результаты могут иметь большое практическое значение для энергетического оборудования, работающего в условиях воздействия кавитации, вызывающей ускоренный износ его элементов, в результате которого возникает необходимость в более частом ремонте и увеличении затрат на замену оборудования. Одним из перспективных направлений применения данного алгоритма является также его интеграция с уже использующимися системами диагностики для повышения качества и оперативности обработки информации.

### **Список литературы**

1. Пылаев, Н. И. Кавитация в гидротурбинах [Текст] / Н. И. Пылаев, Ю. У. Эдель. – Л.: Машиностроение, 1974. – 256 с.

2. Мацевитый, В. М. Особенности эрозии образцов с многослойными покрытиями в условиях кавитации [Текст] / В. М. Мацевитый, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко // Проблемы машиностроения. – 2007. – № 5. – С. 72-78.

3. 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.

4. Лагерева, Э. А. Научные проблемы диагностики каплеударной эрозии влажнопаровых турбин [Текст] / Э. А. Лагерева // Достижения вузовской науки. – 2014. – №8. – С. 168-173.

5. 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. – К., 2006. – Вып. 26. – С. 302-310.

Поступила в редакцию 15.06.2016

## Комп'ютерне моделювання кавітаційної ерозії сталі 20X13 з покриттям

Наведені результати комп'ютерного моделювання ерозійних руйнувань поверхневих шарів зразків сталі 20X13 з двома видами покриттів залежно від часу мікроударного навантаження, що створюється кавітацією. Розроблено модель кавітаційного руйнування і алгоритм розрахунку для кількісної оцінки параметрів процесів, що проходять у матеріалі досліджених зразків при кавітаційному впливі. Отримано добру відповідність результатів комп'ютерного моделювання ерозійних руйнувань поверхні експериментальним даним. Показано, що найкраща ерозійна стійкість відповідає зразкам сталі 20X13 з вакуумно-плазмовим покриттям  $\alpha$ -Ti + TiN.

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

## Computer Simulation of Cavitation Erosion of Coated Steel 20X13

The computer simulation results of erosive fractures of the surface layers of 20X13 steel samples with two kinds of coatings from time of microshock loading generated by cavitation are presented. The model of cavitation and the calculation algorithm to quantify the parameters of the processes occurring in the material samples at cavitation are designed. A good agreement of the computer modeling results of erosive fractures of the surface with the experimental data is received. It is shown that the samples of 20X13 steel with vacuum plasma coating ( $\alpha$ -Ti + TiN) are characterized by the best erosion resistance.

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

**Вакуленко Карина Владимировна** – канд. техн. наук, с.н.с., с.н.с. отдела формообразования в машиностроении, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины.

**Библик Ирина Валентиновна** – гл. инж.-исследов. отдела формообразования в машиностроении, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины.

**Казак Ирина Богдановна** – канд. техн. наук, с.н.с., с.н.с. отдела формообразования в машиностроении, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины.