

УДК 620.11

Кавитационное изнашивание командных деталей технических систем

06, июнь 2012

Ковалев А.А.⁽¹⁾, Подчуфаров А.А.⁽²⁾

*Аспирант⁽¹⁾, студент⁽²⁾,
кафедра⁽¹⁾ «Технологии приборостроения»
кафедра⁽²⁾ «Системы автоматического управления»*

*Научный руководитель: Шашурин В.Д.,
д.т.н., профессор кафедры «Технологии приборостроения»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
kovalevarta@gmail.com

Кавитационный и гидроабразивный износ командных деталей технических систем, которые работают в потоке воды, наносит значительный материальный ущерб. Эрозии подвергаются детали гидротурбин, гребных винтов, насосов, опор скольжения и многих других рабочих устройств. Поэтому проблема повышения долговечности технических систем, выяснение причин вызывающих износ командных деталей является весьма актуальной.

В процессе работы узлы, детали и элементы машин, а также технические системы в целом подвергаются различным видам изнашивания (таблица №1).

Таблица №1. Виды изнашивания

Виды изнашивания	Подвид изнашивания	Определение
Механическое	Изнашивание в результате механических воздействий	
	абразивное	Изнашивание в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц
	гидроабразивное (газоабразивное)	Абразивное изнашивание в результате действия твердых тел или твердых частиц, увлекаемых потоком жидкости (газа)
	гидроэрозионное (газоэрозионное)	Изнашивание поверхности в результате воздействия потока жидкости (газа)
	усталостное	Изнашивание в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов поверхностного слоя
	кавитационное	Изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи

		поверхности, что создает местное высокое давление или высокую температуру
	при фретинге	Изнашивание соприкасающихся тел при колебательном относительном микросмещении
	при заедании	Изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности трения на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность
Адгезионное	Изнашивание в результате трения двух металлических поверхностей под нагрузкой в условиях пластической деформации металла в точках контакта	
Коррозионно-механическое	Изнашивание в результате механического воздействия, сопровождаемого химическим и (или) электрическим взаимодействием материала со средой	
	окислительное	Изнашивание, при котором преобладает химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой
	при фретинг-коррозии	Изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных относительных перемещениях
Тепловое	Изнашивание в результате нагрева зоны трения до температуры размягчения металла	
При действии электрического тока	электроэрозионное	Эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока
Химическое	Изнашивание в результате воздействия различных кислот, щелочей, газов и высокой температуры	

Эрозионное изнашивание материала происходит в результате воздействия на его поверхность потока жидкости, газа, твердых частиц. Интенсивность эрозионного разрушения зависит от большого числа различных факторов. Основными факторами являются плотность энергии внешнего воздействия со стороны жидкости и параметры, характеризующие реакцию твердого материала на это действие.

Реально можно выделить три основных направления борьбы с износами: выбор оптимальных режимов эксплуатации, включая конструктивные мероприятия по уменьшению износов; прогнозирование износов; разработка и применение износостойких материалов. При кавитационном изнашивании распространение получили все три направления, а предпочтение тому или иному из них отдается в зависимости от интенсивности изнашивания и условий эксплуатации.

Интенсивность эрозионного (гидроабразивного) изнашивания зависит от скорости потока, угла атаки с изнашиваемой поверхностью, механических свойств и концентрации воздействующих частиц, агрессивности среды носителя, физико-механических и физических свойств, поверхностных и приповерхностных свойств материала [1].

Представляет практический интерес выявление совместного влияния на износостойкость материалов кавитационного и гидроабразивного изнашивания при струйной кавитации.

Физика кавитации

«Классический» механизм возникновения кавитации заключается в образовании в текущем потоке пузырьков-полостей в зонах разрежения, возникающих во время быстрого движения жидкости по каналам переменного сечения и/или сложной формы.

По сути, причиной этого является то, что исходя из соотношения скорости, сечения и расхода жидкости, количества жидкости просто «не хватает» для плотного заполнения сечения в данном месте канала.

При снижении скорости потока и восстановлении давления такие пузырьки-разрывы почти мгновенно «схлопываются», при этом возникает микро-гидроудар. Это возникновение кавитации по механическим причинам.

Когда кавитационные пузырьки образуются за счёт скоростного разрыва потока, то в них — практически вакуум, давление, близкое к нулю. Свободные пузырьки в потоке жидкости движутся быстро, а время жизни их очень мало, поэтому прямые измерения провести сложно. Прямые измерения проводились лишь для квазистационарных областей разрежения в зоне кавитации, и там присутствуют пары жидкости и выделившиеся из неё растворённые газы, т.к. область квазистационарная и она собирает растворённые газы со всего огромного объёма жидкости, прошедшего по её границам за всё время её существования. Поэтому давление выделившихся растворённых газов там может быть вполне заметным, но оно же не даст этой области мгновенно «схлопнуться» в случае исчезновения условий кавитации, — эти газы образуют хотя и сжавшуюся в размерах, но достаточно долгоживущую группу пузырей.

Молекулы и микропузырьки растворённых газов могут лишь являться «точками разрыва» жидкости, центрами возникновения, провоцирующими образование кавитационных пузырьков именно в данном месте, но никак не могут создать внутри них сколь-нибудь существенное давление. Поэтому с механической точки зрения обычно можно считать, что кавитационные пузырьки внутри потока являются областями вакуума — такого же, как тот, что возникает в «зоне отрыва» достаточно сильного «обычного» гидроудара и однозначно фиксируется приборами именно как почти абсолютный ноль давления.

Кавитационный пузырёк за время своей жизни проходит две стадии: рост и схлопывание. В большинстве случаев эти процессы происходят с разной скоростью, причём эта разница принципиальна и обуславливает многие особенности кавитации.

Рост кавитационного пузырька почти всегда происходит намного медленнее, чем его схлопывание — и чем выше напор жидкости, тем больше эта разница. Разрыв потока определяется «отрицательным» давлением, то есть разрывающими усилиями, возникающими в толще жидкости. Для сверхчистых жидкостей в специальных условиях эти усилия могут достигать весьма существенных величин, однако в обычных условиях, да ещё в движущемся потоке, жидкость рвётся почти без усилий. С учётом того, что перед разрывом все части жидкости в ближайших окрестностях точки разрыва имели практически одинаковую скорость, их расхождение будет достаточно медленным, что ограничивает скорость роста каждого отдельного пузырька. Если условия требуют более интенсивного роста, то это будет компенсироваться увеличением количества точек разрыва, т.е. бóльшим дроблением жидкости — вплоть до превращения её в пену, — но сами образующиеся пузырьки будут иметь примерно один и тот же размер. По мере дальнейшего роста в зависимости от расположения исходных «точек разрыва», эти пузырьки могут разрастаться и объединяться. При стабилизации кавитационных условий возможна «перегруппировка» пузырьков, когда часть из них исчезнет, а оставшаяся часть увеличится в размерах, однако этот процесс потребует достаточно заметного времени, исчисляемого как минимум несколькими миллисекундами.

Когда условия для кавитации пропадают и внешнее давление начинает нарастать, стенки пузырька устремляются навстречу друг другу. Этот процесс прямо определяется внешним давлением, и чем оно выше, тем больше сила, действующая на стенки, тем больше их ускорение.

Таким образом, можно сказать, что во время роста пузырьков ничего особо экстремального и разрушительного не происходит. Всё самое необычное может происходить лишь в момент схлопывания пузырька. Это подтверждается экспериментальными фактами, например, однозначно установлено, что вспышки при сонолюминесценции происходят именно в момент схлопывания пузырька, а не в период его образования.

Чтобы достичь наиболее экстремальных условий при схлопывании кавитационного пузырька — максимально возможных давления и температуры, — температура жидкости, в которой этот пузырёк образуется, должна быть как можно ниже. В основе этого лежит необходимость обеспечения минимального давления внутри пузырька, что должно уменьшить сопротивление его схлопыванию и, соответственно, позволить получить максимальную скорость стенок в конце схлопывания. Как известно, практически всегда парообразование жидкости и равновесное давление её паров резко уменьшается при понижении её температуры. Минимальными эти параметры становятся возле точки замерзания. В холодной воде кавитация интенсивнее. Косвенным подтверждением этого служит, например, существенное повышение яркости сонолюминесценции в более холодной воде, если все прочие условия остаются неизменными [2].

Моделирование кавитационных процессов

В основу моделирования кавитационных процессов заложим теорию моделирования взрывных процессов [3], т.к. при схлопывании кавитационной каверны образуется кумулятивная струя высокой энергии.

Для создания рациональных конструкций, учитывая кавитационное воздействие на них, необходимы предварительные обширные исследования, включающие в себя математическое моделирование, испытание моделей и натурных изделий. Полное математическое решение задачи о функционировании конструкций с учетом точности изготовления и реальных свойств применяемых материалов не всегда возможно в настоящее время. Испытания и исследования натурных образцов могут быть проведены только после того, как они уже созданы. Но для их создания необходим комплекс соответствующих исследований, среди которых важнейшую роль играют испытания моделей.

Моделирование есть метод изучения объективных закономерностей с помощью моделей. Экспериментальные исследования, проводимые на моделях, требуют специальных приемов постановки опытов и интерпретации полученных результатов для количественного описания полномасштабных процессов в натурных конструкциях. Решение этой задачи основано на теории подобия и моделирования физических явлений, которое является методологической основой постановки и обработки экспериментальных исследований с помощью моделей.

Рассмотрим алгоритм применения теории моделирования.

Прежде всего, необходимо выделить систему параметров, определяющих данное явление. В число определяющих параметров a_i включают все размерные и безразмерные параметры, связанные с существом изучаемого явления. В число этих параметров можно включать также координаты x, y, z и время t . Существуют два способа определения параметров a_i , где i — 1, 2... k .

Первый способ заключается в том, что для данного явления составляют полное математическое описание, адекватное реальному объекту: систему дифференциальных уравнений движения, уравнения состояния среды, уравнения, характеризующие прочность среды, начальные и граничные условия. Затем из этой системы уравнений выписывают определяющие параметры a_i .

При втором способе на основе глубокого знания физики рассматриваемого явления формируется система определяющих параметров без составления математического описания процесса.

Затем из этих k определяющих параметров составляют $(k - m)$ независимых безразмерных комбинаций λ_j , где $j=1,2 \dots (k - m)$, m - число независимых размерностей. В механических задачах $m = 3$, например, в системе СИ: килограмм, секунда, метр. В систему λ_j должны входить все определяющие параметры a_i . Поскольку безразмерные параметры λ_j могут быть различными при соблюдении этих двух правил (число λ_j равно $(k - m)$ и все a_i входят в систему λ_j), то следует стремиться получить более простые комбинации λ_j , а также, чтобы они содержали, когда это возможно, определенный физический смысл, например, отражали отношение параметров, характеризующих прочность, скоростной напор и т. п. Среди комбинаций λ_j есть постоянные величины, а есть переменные, когда в них входят координаты и время.

Пусть размерная искомая величина является функцией определяющих параметров:

$$a = f(a_1, a_2, \dots, a_k). \quad (1)$$

Это уравнение может быть представлено как функциональная зависимость между безразмерными комбинациями, согласно π -теореме:

$$\lambda = \Phi(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{k-m}) \quad (2)$$

где λ — безразмерная комбинация, содержащая размерную искомую величину "а". Она получается с помощью параметров a_i . Уравнение (2) называется критериальным уравнением. Если все безразмерные комбинации λ_j в модели и натуре равны, т.е.

$$(\lambda_j)_H = (\lambda_j)_M \quad (3)$$

где $j = 1, 2, \dots, (k - m)$, то функция (2) справедлива для подобных процессов, протекающих в модели и в натуре. При подобии физических явлений сходственными точками, моментами времени и параметрами будут такие величины, при которых их значения в натуре соответствуют значениям в модели. Частным случаем этого соответствия является их пропорциональность. Критериальное уравнение (2) определяется из опыта с помощью моделей. Оно справедливо и для «натуры», если соблюдаются соотношения (3).

Модель процесса взрыва пузырька можно описать системой уравнений газодинамики:

1. Закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_i (\rho u^i) = 0$$

2. Закон сохранения количества движения:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u^i + G^i) + \nabla_j (\Pi^{ij} + T^{ij}) - \nabla_j \tau^{ij} - F_g^i = 0$$

3. Закон сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e + \frac{\rho u^2}{2}) + \nabla_j [\rho u^j (e + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho}) - u_i \tau^{ij}] = 0$$

4. Уравнение состояния вещества:

$$p = p(\rho, e)$$

Здесь t и ∇_j — время и пространственные координаты; ρ и u_i — плотность и компоненты массовой скорости вещества; G^i — компоненты вектора плотности импульса излучения G ; $\Pi = \rho u^i u^j + \delta^{ij} p$ — тензор плотности потока импульса вещества; p — газодинамическое (газокинетическое) давление; δ^{ij} — символы Кронекера; T^{ij} — тензор плотности потока импульса излучения; τ^{ij} — тензор вязких напряжений; F_g^i — i -я составляющая неэлектрических сил, например, силы тяжести.

Данная система уравнений является основой физико-математической модели кавитационного процесса.

Экспресс-диагностика функциональных покрытий путём воздействия на них высокоскоростной кавитирующей гидродинамической струи

Как было сказано выше, одним из способов борьбы с износом является разработка и применение износостойких материалов, в частности различных функциональных покрытий.

Покрытия наносятся, как правило, газотермическими способами: газопламенное и высокоскоростное сверхзвуковое газопламенное напыление (HVOF), плазменное (APS) и детонационное напыление, электродуговая металлизация и др.

При этом надо иметь ввиду, что многообразие функциональных покрытий (состав, архитектура) и технологий их нанесения не позволяет обоснованно выбрать максимально адаптированное под условия эксплуатации наиболее эффективное покрытие и рациональный способ его нанесения.

В связи с этим представляется актуальной задача разработки методики выбора функционального покрытия максимально пригодного к реальным условиям работы технической системы. Данная методика основана на гидродинамической экспресс-диагностике износостойкости покрытия.

В основе методике лежит воздействие высокоскоростной кавитирующей гидродинамической струи на материалы, включая функциональные покрытия. В результате этого воздействия в объеме материала-мишени образуются гидрокаверны. По глубине гидрокаверн и по потерям массы мишеней можно выбрать наиболее износостойкие покрытия, максимально адаптированные под условия эксплуатации. Данная диагностика проводится за несколько секунд. В то время как с помощью ультразвуковой магнитострикционной установки, получившей широкое распространение в лабораториях испытаний материалов на кавитационную стойкость, диагностика осуществляется около 6 ч. [4], что является существенным недостатком при проектировании машин.

Более того, в экспресс-диагностику для прогнозирования износостойкости материалов должна входить программа, в основе которой лежит математическая модель, определяющая степень износа. Проведенный анализ показал, что пока отсутствует общепринятый критерий кавитационной износостойкости, надежно работающий для всех материалов и условий изнашивания [4]. Тем самым, представляется актуальной задача создания критерия, на основе которого можно будет прогнозировать износостойкость материалов, включая функциональных покрытий.

Список использованной литературы

1. Родионов В.П. Моделирование кавитационно-эрозионных процессов, возбуждаемых струйными гидродинамическими излучателями: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.02.04 – М.: Санкт-Петербург, 2001;
2. Явление кавитации – <http://khd2.narod.ru/index.htm>;
3. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. — Изд. 3-е, испр. — В 2 т. Т. 2. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004;
4. Кукинова Г.В. Износостойкость рабочих органов гидроагрегатов химических производств при гидроэрозии в неоднородных агрессивных жидких средах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.02.04 – М.: Невинномысск, 2006.