

УДК 532.528:620.193.16

НОВАЯ МОДЕЛЬ ЭРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ

В. Т. Кузавов

Представлено академиком РАН В.М. Титовым 30.11.2018 г.

Поступило 27.12.2018 г.

Предложена новая физическая (экспериментальная) модель кавитационного разрушения исследуемых материалов. В современной модели кавитационного воздействия разрушения материалов связаны с ударами кумулятивных струй, образующихся при несимметричном захлопывании кавитационных пузырьков вблизи твёрдой поверхности и ударных волн, возникающих при их сжатии. В новой модели эрозионное разрушение объясняется образованием в исследуемых материалах новых структур, ранее неизвестных в литературе, кавитационных трубок (к-трубок), имеющих спиральную высокочастотную структуру. Разрушение материалов связано с фокусировкой акустической энергии вдоль оси спиральных структур. При фокусировке энергии происходит значительное увеличение давления и температуры вдоль оси спиральных структур, что и приводит к разрушению исследуемых материалов.

Ключевые слова: кавитация, эрозионное разрушение, спиральная структура, фокусировка акустической энергии.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524896581-584>

Когда паровые турбины внедрялись на судах в качестве главных двигателей (1900–1910 гг.), впервые столкнулись со случаями быстрого разрушения лопастей гребных винтов. В 1919 г. английский учёный К.А. Парсонс выступил в обществе корабельных инженеров с докладом, в котором подчёркивалось, что основной причиной разрушения гребных винтов является эрозия, т.е. механическое разрушение под воздействием ударов воды о поверхность лопастей. Ударное воздействие воды возникает в момент замыкания кавитационных пузырей. Впоследствии неоднократно наблюдали и описывали случаи эрозионного разрушения лопастей водяных турбин, насосов и другого гидравлического оборудования. Большое количество работ посвящено этой проблеме [1–6]. Возникло несколько точек зрения на физическую природу этого явления. Большинство исследователей соглашалось с тем, что первопричиной эрозии является ударное воздействие воды о поверхность металла и разрушение его связано с поверхностной усталостью материала. В противоположность этой точке зрения некоторые авторы связывают процесс выкрашивания материала с усилиями, развивающимися при замыкании кавитационных пузырей. Известно мнение, что развитию повреждений способствует возникновение высоких температур в последних стадиях сжатия кавитаци-

онных пузырьков, в связи с этим могут иметь место термоэлектрические эффекты и различные электрохимические процессы. Большое количество работ посвящено гипотезе о сильном влиянии на кавитационную эрозию коррозионных и окислительных процессов. Но, по мнению многих авторов, важную роль играет механическое воздействие воды, экспериментально подтверждена способность кавитации разрушать материалы с диэлектрическими свойствами, химически инертные и очень тугоплавкие, поэтому механическое воздействие может быть достаточно сильным, чтобы разрушать любой применяемый материал. Многообразие точек зрения на физическую природу явления кавитационной эрозии, обилие журнальных статей и различных экспериментальных исследований за прошедшее столетие подчёркивают сложность этого явления, поэтому общая теория кавитационной и гидродинамической эрозии отсутствует даже в самой приближённой постановке. Из широкого разнообразия физических, химических, электрических и термодинамических свойств материалов в сочетании с разными видами кавитационного воздействия число различных возможных комбинаций может быть огромным. Поэтому делается вывод, что вряд ли удастся найти единое объяснение всех причин кавитационного разрушения [1].

В современной модели кавитационного разрушения повреждения, возникающие в исследуемых материалах, связывают с воздействием ударных волн, возникающих при схлопывании пузырьков

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск
E-mail: kuzavov@hydro.nsc.ru*

и вследствие удара кумулятивных струй, образующихся при несимметричном схлопывании пузырьков вблизи твёрдых поверхностей. Поэтому разрушение исследуемых материалов связано с образованием микрократеров от удара кумулятивных струй и сколов уже разрушенной поверхности при воздействии ударных волн. Важно отметить, что современный механизм кавитационного разрушения, так как он связан с механическим воздействием на исследуемые материалы, подразумевает, что все разрушения начинаются со свободной поверхности этих материалов. Какие механические или другие характеристики материалов являются определяющими для его эрозионной стойкости? Возможны ли другие механизмы разрушения, кроме механического, при кавитационном воздействии? На эти и другие вопросы до сих пор нет ответа. Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований, результаты которых могли бы частично ответить на эти вопросы.

Эксперименты проводились в стандартной установке вибрационной эрозии. На дне сосуда с водой закреплялся исследуемый материал. На определённом расстоянии от него находился ультразвуковой излучатель, колеблющийся с частотой 22 кГц. Амплитуда колебаний излучателя составляла 20–30 мкм. Между излучателем и исследуемым материалом возникала кавитационная зона, которая и приводила к разрушению материалов. Перед проведением экспериментов поверхность выбранных материалов тщательно подготавливалась. Время проведения экспериментов менялось в зависимости от свойств выбранного материала. Какие повреждения следовало ожидать? Это микрократеры от удара кумулятивных струй и сколы повреждённой поверхности. На рис. 1 представлены поверхность



Рис. 1. Повреждение под свободной поверхностью в эбоните.

эбонитовой пластинки и её срез после проведения эксперимента. Поверхность эбонита, расположенная под излучателем, поднимается примерно на 200 мкм. На её срезе не обнаружено микрократеров от удара кумулятивных струй. Но на глубине примерно 3 мм образовалась огромная трещина, не связанная повреждениями от микрократеров с поверхностью эбонита. Результаты проведённого эксперимента противоречат выводам современной модели эрозионного разрушения. Повреждения возникают под свободной поверхностью, а не на ней. Чтобы зафиксировать образующиеся в глубине исследуемых материалов микроразрушения, были проведены эксперименты на прозрачных средах (органическое и обычное стекло) и на других материалах. На рис. 2 представлен отдельный цилиндрический канал, образующийся на небольшой глубине (менее 1 мм) от свободной поверхности. На оси канала представлена сфокусированная область схождения акустических волн. В исследуемых материалах образуются многочисленные цилиндрические структуры и хаотично расположенные под свободной поверхностью структуры. Цилиндрические структуры имеют диаметр 10–15 мкм и могут быть гладкими, т.е. имеют спиральную структуру без видимых спиральных витков. На рис. 3 представлена спиральная структура в органическом стекле толщиной 1 мм. Частота ультразвукового генератора 22 кГц, частоты спиральных структур меняются примерно от 0,5 до 5 мГц. Спиральные и гладкие структуры могут прерываться, менять направления. В дальнейшем все структуры будем называть к-трубками (кавитационными).

Так как к-трубки имеют спиральную структуру, то вдоль их осей будет происходить фокусировка акустической энергии. На оси к-трубки будут значительно повышаться давление и температура, что приведёт к разрушению самой структуры и образованию микротрещин в исследуемом материале.



Рис. 2. Цилиндрический канал в органическом стекле. Вид сверху.



Рис. 3. Спиральная структура в органическом стекле. Вид сверху.

Следует отметить, что к-трубка является источником образования субмикротрещин и микротрещин. Если к-трубка находилась на глубине менее 10–50 мкм от свободной поверхности, то при фокусировке происходит её разрушение и отделение верхнего тонкого слоя исследуемого материала от свободной поверхности, т.е. её верхней части. В [1] представлен типичный размер частиц, отделяющихся при кавитационном разрушении в гидродинамической постановке. Оказалось, что большинство частиц имеет размер 13 мкм. Диаметр к-трубки примерно равен 10–15 мкм, поэтому размеры отделяющихся частиц при гидродинамической кавитации почти совпадают с диаметрами к-трубок, образующихся при вибрационной эрозии. Это является косвенным подтверждением существования единого механизма кавитационного разрушения. Все вышеперечисленные экспериментальные результаты были получены при исследовании прозрачных сред. Обработка этих результатов была проведена на оптическом микроскопе с ограниченным увеличением, что не позволяло увидеть более тонкую структуру кавитационного разрушения. Поэтому были проведены эксперименты на органическом стекле, а затем на исследуемую уже разрушенную поверхность напылялся тонкий слой меди (7–10 мкм). Этот метод даёт возможность рассматривать повреждения на электронном микроскопе при значительно бóльших увеличениях. На небольшой глубине от свободной поверхности образуются цилиндрические и спиральные структуры (к-трубки), что приводит к появлению на её поверхности многочисленных впадин и подъёмов (от единиц до десятков микрон) и возникновению микротрещин.

Какие повреждения будут образовываться в металлах? Рассмотрим поведение пластичных металлов при кавитационном нагружении. На рис. 4 представлена фотография волновой поверхности свинца с достаточно крупными возвышениями и впадинами на его поверхности (200–300 мкм). Они объясняются образованием новых структур (к-трубок) на небольшой глубине от свободной поверхности. С точки зрения современной (принятой) модели волновая структура возникает при ударах схлопывающихся кавитационных пузырьков и кумулятивных струй о свободную поверхность исследуемых материалов. С увеличением времени проведения экспериментов отдельные возвышения увеличиваются и разрушаются, как показано на рис. 4. С увеличением твёрдости исследуемых материалов (алюминий, стали разных марок, цветные металлы) на их поверхностях образуются значительно меньшие по своим разме-



Рис. 4. Волновая структура свободной поверхности свинца после проведения эксперимента. Разрушение отдельных возвышений.

рам возвышения и впадины, чем на свинце, но структура повторяет пластичные материалы.

На основании проведённых экспериментальных работ возникает вопрос: ответственно ли механическое воздействие воды, как отмечают многие авторы, за разрушение материалов при кавитации? С этой целью проведём эксперимент в стандартной постановке для вибрационной эрозии, представленный ранее, но без воды. Нет кавитационной зоны, ответственной за разрушения. Нет воздействия ударных волн, образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков, и нет ударов кумулятивных струй. Излучатель колеблется в воздухе, создавая только акустическое воздействие на исследуемый материал. Непосредственно под излучателем в исследуемом материале образуются точно такие же структуры, как при кавитационном воздействии. Таким образом, можно заключить: механическое воздействие воды не является определяющим фактором разрушения материалов при кавитационном воздействии.

В работе представлен новый механизм эрозионного разрушения, на основании которого можно создавать новые материалы, стойкие к кавитационному воздействию, так как параметры спиральных структур зависят от физических свойств материалов. Проведены экспериментальные исследования и установлено, что при воздействии механических, акустических, электромагнитных полей в материалах образуются спиральные структуры, которые

являются источниками возникновения микротрещин, т.е. источниками разрушения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф.* Кавитация. М.: Мир, 1974. 687 с.
2. *Перник А.Д.* Проблемы кавитации. Л.: Судпромгиз, 1963. 334 с.
3. *Прис К.* Эрозия. М.: Мир, 1982. 464 с.
4. *Воскресенский И.Н.* Коррозия и эрозия судовых гребных винтов. Л.: Судпромгиз, 1949. 346 с.
5. *Зельдович Я.Б.* // ЖЭТФ. 1942. Т. 12. С. 498–525.
6. *Philipp A., Lauterborn W.* Cavitation erosion by single laser-produced bubbles // J. Fluid Mechanics. 1998. V. 361. P. 75–116.
7. *Кузавов В.Т.* Кавитационное разрушение материалов в спиральных структурах в постановке вибрационной эрозии // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 6. С. 90–94.

THE NEW MODEL OF EROSION DESTROYING

V. T. Kuzavov

*Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS V.M. Titov November 30, 2018

Received December 27, 2018

A new physical (experimental) model of cavitation destruction of the studied materials is proposed. In the modern model of the cavitation effect, the destruction of materials is associated with the impacts of cumulative jets, which are formed during the asymmetric slamming of cavitation bubbles near the solid surface and the shock waves that occur during their compression. In the new model, erosion damage is explained by the formation of cavitation tubes (c-tubes) with a spiral high-frequency structure in the materials under study that were previously unknown in the literature. The destruction of materials is associated with the focusing of acoustic energy along the axis of the spiral structures. When focusing energy, there is a significant increase in pressure and temperature along the axis of the spiral structures, which leads to the destruction of the materials under study.

Keywords: cavitation, erosion destruction, spiral structure, focusing of acoustic energy.