Исследование кавитационной прочности защитных покрытий в аномальных условиях

В. Н. Хмелёв^{1,*}, Р. В. Барсуков^{1,*}, Р. Н. Голых^{1,*}, Д. В. Генне^{1,*},
Д. С. Абраменко^{1,*}, С. Н. Цыганок^{1,*}, А. Р. Барсуков^{1,*}

¹Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», Бийск, Россия

Аннотация

Одним из возможных механизмов разрушения металлов и других материалов является кавитация. Акустическая кавитация возникает в жидких средах при распространении в них акустических колебаний большой интенсивности. В статье рассмотрены особенности способа исследования кавитационной прочности защитных покрытий (в том числе в аномальных условиях), основанного на контроле кавитационных явлений в озвучиваемой среде, за счет контроля параметров ультразвуковых (УЗ) излучателей. В работе показано, что помимо степени развития кавитации в озвучиваемой среде на параметры УЗ излучателей так же влияет величина зазора между излучающей и отражающей поверхностями. Результаты, полученные в работе, показывают, что реализация контроля кавитационной прочности покрытий при различных температурах и давлениях требует применения непрерывного контроля для автоматического устранения такого влияния за счет оптимизации интенсивности воздействия.

Ключевые слова

Ультразвук, кавитация, контроль, кавитационная эрозия, метод.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Госкорпорации «Росатом» в рамках научного проекта № 20-011-70001 «Исследование формирования и развития кавитационных процессов при аномально высоких температурах в жидких средах, контактирующих с различными материалами и покрытиями для создания метода и средств контроля их эрозионной прочности».

Введение. Одним из возможных механизмов разрушения металлов (и других материалов) и их покрытий является кавитация, которая представляет собой процесс образования и последующего схлопывания парогазовых пузырьков в жидкости. Это явление встречается повсеместно, поскольку гидродинамическая кавитация возникает в результате локального понижения

* Для переписки

Email addresses: vnh@u-sonic.ru, roman@bti.secna.ru, grn@bti.secna.ru, gdu@u-sonic.ru, ades@bti.secna.ru, grey@bti.secna.ru, alex_bars@u-sonic.ru

давления в жидкости за счет движущихся в ней элементов различных механизмов (насосов, например) или при обтекании жидкостью неподвижных элементов, а акустическая кавитация возникает в жидких средах при распространении в них акустических колебаний большой интенсивности.

В настоящее время, для определения степени кавитационной стойкости материалов и их покрытий применяется способ испытаний кавитационной эрозии, регламентированный стандартом ASTM G32-10 «Стандартный способ испытаний кавитационной эрозии» [1, 5]. Основным недостатком способа является сложность обеспечения одинаковой интенсивности кавитационного воздействия на покрытия через жидкостные промежутки и в условиях, отличных от нормальных (т.е. при высоких температурах, давлениях и в агрессивных средах).

Проблема обеспечения достоверного контроля заключается в необходимости контроля кавитационного воздействия для обеспечения соответствующей (одинаковой) эрозии.

До настоящего времени на практике использовался способ контроля кавитационной стойкости материалов и их покрытий [2, 3], предложенный авторами, в котором задача контроля интенсивности кавитационного процесса в среде решалась путем контроля параметров и характеристик УЗ излучателей, формирующих УЗ поле. В работе [4] показано влияние степени развития кавитационных явлений вблизи излучающей поверхности на параметры и характеристики УЗ излучателей, что может быть использовано для косвенного контроля процесса кавитации.

Однако не только изменение параметров (импеданса) среды, за счет протекающих в ней кавитационных

явлений, влияет на параметры и характеристики УЗ излучателей. В большинстве случаев отмечается влияние отражающих элементов, в частности поверхности образца с покрытием, на параметры и характеристики УЗ излучателей. Основное влияние, как отмечается в работах различных авторов, оказывают резонансные явления в обрабатываемой среде. Эти явления, при реализации способа косвенного контроля кавитационных явлений в среде за счет контроля параметров УЗ излучателей необходимо учитывать, а так же знать условия их возникновения.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Для исследования влияния резонансных явлений в зазоре между излучающей и отражающей поверхностями были проведены измерения основных параметров УЗ излучателей, таких как: электрический импеданс, его действительная и мнимая составляющие, резонансная частота при реализации кавитационного воздействия на жидкую среду при нормальных условиях.

Результаты. На рисунке 1 схематично изображен фрагмент УЗ излучателя в виде волновода 1 и механически соединенным с ним рабочим (излучающим) инструментом 2.

Рисунок 1 – Область между излучающей поверхностью и отражающей плоскостью

В случае, когда при формировании кавитационного воздействия между плоскостью излучающего инструмента 2 и плоскостью покрытия 3 образуется зазор h , возможно возникновение условий, при которых акустическое сопротивление среды может иметь как активный, так и реактивный характер. Одним из таких условий является величина зазора h . При определенных условиях в зазоре возможно возникновение стоячей волны, при этом импеданс среды в зазоре резко снижается, что влияет на электрический импеданс УЗ излучателя, что приводит к изменению условий кавитационного воздействия на покрытия.

При проведении экспериментальных исследований величина зазора h

ступенчато изменялась, при этом осуществлялись все необходимые замеры параметров УЗ излучателя. Для проведения экспериментов был использован УЗ аппарат серии «Волна-М» [6], предназначенный для воздействия на жидкие среды, максимальная мощность которого составляет 600 Вт. Измерения проводились для двух уровней мощности 180 и 600 Вт (уставка мощности 30 и 100% соответственно).

На рисунке 2 представлены кривые импеданса УЗ излучателя, а так же его активной и реактивной составляющих, полученных для различных расстояний между излучающей поверхностью и плоским отражателем.

Рисунок 2 – Зависимость импеданса УЗ излучателя от расстояния от излучающей поверхности до отражателя
а) модуль импеданса; б) активная составляющая импеданса; в) реактивная составляющая импеданса

Из представленных экспериментальных данных следует, что характер зависимостей, полученных для уставки мощности 30% и 100%, отличается. Кривая импеданса Z при уставке 100% имеет незначительное падение от 141,5 до 139 Ом (можно сказать, что не меняется), а при уставке мощности 30% имеет характерные черты и изгибы для различных h .

При 100 % уставке мощности изменение акустических свойств зазора маскируется на фоне собственного импеданса УЗ излучателя, и при изменении величины зазора h характерного влияния не наблюдается. При 30 % уставке мощности проявляются сильные характерные изменения на кривых Z и R , что вероятнее всего связано с более сильным влиянием импеданса среды на фоне собственного импеданса УЗ излучателя, соответствующего меньшей мощности УЗ излучения.

На рисунке 3а представлены зависимости сдвига фаз между током и напряжением на пьезопреобразователе УЗ излучателя от расстояния между излучающей и отражающей поверхностями, полученные для двух уставок мощности. На рисунке 3б представлены зависимости резонансной частоты УЗ излучателя от расстояния, полученные так же для двух уставок мощности.

Из представленных, на рисунке 3 зависимостей следует, что характерные изменения контролируемого параметра (фаза) от величины зазора h сильнее проявляется при меньших интенсивностях УЗ излучения, а резонансная частота УЗ излучателя при максимальной мощности УЗ воздействия практически не зависит от величины зазора h .

Очевидно, что использование разнообразных жидкостей для исследования кавитационной прочности покрытий, реализация исследований при различных температурах и давлениях потребует применения

реализованного контроля и выявления зависимостей от величины зазора для каждого конкретного случая для учета такого влияния или автоматического устранения такого влияния за счет оптимизации интенсивности воздействия для определенного зазора.

Рисунок 3 – Зависимость а) сдвига фаз между током и напряжением на УЗ излучателе; б) резонансной частоты УЗ излучателя от расстояния от излучающей поверхности до отражателя

Обсуждение полученных результатов. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что способ исследования кавитационной прочности защитных покрытий в аномальных условиях с применением способа косвенного контроля кавитационных процессов и явлений в жидкой среде, заключающегося в непрерывном контроле параметров УЗ излучателей, имеет ряд особенностей, требующих учета. Влияние на УЗ поле отражающих поверхностей и расстояния между ними и излучающей поверхностью.

Закключение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что реализация контроля кавитационной прочности покрытий при различных температурах и давлениях потребует применения непрерывного контроля для автоматического устранения такого влияния за счет оптимизации интенсивности воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

[1] ASTM G32-10, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus ASTM International: West Conshohocken. 2010. URL: www.astm.org.

[2] Способ испытаний кавитационной эрозии: Патент РФ на ИЗ №2739145 С1 МПК G01N 3/56 (2006.01) G01N 3/32 (2006.01); заявка № 2020129547, 07.09.2020. Опубликовано: 21.12.2020, Бюл. № 36.

[3] Khmelev V.N., Barsukov R.V., Golykh R.N., Abramenko D.S., Genne D.V., Tertishnikov P.P. Method and means of cavitation erosion tests under abnormal

conditions. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1679. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/4/042041.

[4] Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Ильченко Е.В., Попова Н.С., Генне Д.В. Контроль параметров пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для исследования кавитационной активности в жидких средах. *Датчики и системы*, 2015, № 7 (194), с. 25-30.

[5] Khmelev V.N., Kuzovnikov Yu.M., Khmelev S.S., Levin S.V., Khmelev M.V. Ultrasonic device designed for the studying of cavitation resistance of materials. *Proc. 17th Int. Conf. of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices*, 2016. pp. 260-3.

[6] Ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна-М». URL: https://www.u-sonic.ru/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_protsesov_v_zhidkikh_sredakh/volna_m2/.

Хмелёв Владимир Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по научной работе, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

Барсуков Роман Владиславович — канд. техн. наук, доцент, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

Голых Роман Николаевич — д-р техн. наук, доцент, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

Генне Дмитрий Владимирович — ведущий инженер, ООО «Центр ультразвуковых технологий» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

Абраменко Денис Сергеевич — канд. техн. наук, доцент, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

Цыганок Сергей Николаевич — канд. техн. наук, доцент, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

Барсуков Александр Романович — студент, кафедра методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (Российская Федерация, 659305, Алтайский край, Бийск, ул. Трофимова, 27).

Investigation of the cavitation strength of protective coatings under abnormal conditions

V. N. Khmelev^{1,*}, R. V. Barsukov^{1,*}, R. N. Golykh^{1,*}, D. V. Genne^{1,*},
D. S. Abramenko^{1,*}, S. N. Tsyganok^{1,*}, A. R. Barsukov^{1,*}

¹ *Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, Biysk, Russia*

Abstract

One of the possible mechanisms for the destruction of metals and other materials is cavitation. Acoustic cavitation occurs in liquid media when high-intensity acoustic vibrations propagate in them. The article discusses the features of the method for studying the cavitation strength of protective coatings (including under abnormal conditions). The method is based on the control of cavitation phenomena in the voiced medium, by controlling the parameters of ultrasonic emitters. It is shown that the parameters of ultrasonic emitters are affected by the size of the gap between the emitting and reflecting surfaces.

* *Corresponding author*

Email address: vnk@u-sonic.ru, roman@bti.secna.ru, grn@bti.secna.ru, gdu@u-sonic.ru,
ades@bti.secna.ru, grey@bti.secna.ru, alex_bars@u-sonic.ru

The results obtained in the work show that the implementation of the control of the cavitation strength of coatings at various temperatures and pressures requires the use of continuous control to automatically eliminate this effect by optimizing the intensity of the impact.

Keywords

Ultrasonic, cavitation, control, cavitation erosion, method.

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research and the State Corporation "Rosatom" in the framework of the scientific project No. 20-011-70001 "Investigation of the formation and development of cavitation processes at abnormally high temperatures in liquid media in contact with various materials and coatings to create a method and means for controlling their erosion strength".

REFERENCES

- [1] ASTM G32-10, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus ASTM International: West Conshohocken. 2010. URL: www.astm.org.
- [2] Способ испытанij кавитационной jерозии: Patent RF on invention №2739145 S1 MPK G01N 3/56 (2006.01) G01N 3/32 (2006.01); request № 2020129547, 07.09.2020. Publ: 21.12.2020, Bull. № 36. (In Russ.)
- [3] Khmelev V.N., Barsukov R.V., Golykh R.N., Abramenko D.S., Genne D.V., Tertishnikov P.P. Method and means of cavitation erosion tests under abnormal conditions. Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1679. DOI: 10.1088/1742-6596/1679/4/042041.
- [4] Khmelev V.N., Barsukov R.V., Il'chenko E.V., Popova N.S., Genne D.V. Kontrol' parametrov p'ezojelektricheskikh ul'trazvukovykh kolebatel'nykh sistem dlja issledovaniya kavitacionnoj aktivnosti v zhidkikh sredah. Datchiki i sistemy, 2015, № 7 (194), pp. 25-30. (In Russ.)
- [5] Khmelev V. N., Kuzovnikov Yu. M., Khmelev S. S., Levin S. V., Khmelev M. V. Ultrasonic device designed for the studying of cavitation resistance of materials. Proc. 17th Int. Conf. of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices, 2016. pp. 260-300.
- [6] Ul'trazvukovoj tehnologicheskij apparat serii «Volna-M». URL: https://www.ultrasonic.ru/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_protseessov_v_zhidkikh_sredakh/volna_m2/. (In Russ.)

Khmelev V. N. — Dr. Sc. (Eng.), professor, deputy director for research, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation)

Barsukov R. V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Golykh R. N. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Genne D. V. — lead engineer, Ltd «Center of ultrasonic technologies » (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Abramenko D. S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Tsyganok S. N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Barsukov A. R. — student, department of methods and instruments of measurement and automation, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University (Trofimova st., 27, Biysk, Altai krai, 659305 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Исследование кавитационной прочности защитных покрытий в аномальных условиях / В. Н. Хмелёв, Р. В. Барсуков, Р. Н. Голых, Д. В. Генне, Д. С. Абраменко, С. Н. Цыганок, А. Р. Барсуков // Промышленные процессы и технологии. 2021. № 1. С. 53 – 60.

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-53-60

Please cite this article as:

Khmelev V.N., Barsukov R. V., Golykh R. N. et al. Investigation of the cavitation strength of protective coatings under abnormal conditions. *Industrial processes and Technologies*, 2021, no. 1, pp. 53 – 60

DOI: 10.37816/2713-0789-2021-1-1-53-60