

PECULIARITIES OF A CHANGE IN THE SURFACE PROFILE OF ALUMINUM BRONZES IN CAVITATION WEAR IN SEA WATER

Yu. N. Tsvetkov, Ye. O. Gorbachenko

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Aluminum bronzes BrA9Zh4N4L and BrA7MtZ15Zh3N2Tz2L, used to manufacture ship propellers, were tested on the ultrasonic vibratory apparatus in artificial sea water. Cavitation attack intensity was altered through change in amplitude of horn end oscillation from 15 to 25 μm . It was demonstrated that the arithmetical mean deviation of the assessed profile, corresponding to the end of incubation period of wear, increases compared to the value obtained in fresh water. As the value of the arithmetical mean deviation of the assessed profile, corresponding to the end of the incubation period of wear in fresh water, is constant and does not depend on the intensity of cavitation attack, the analogous value of this parameter, obtained in sea water, increases with the increase in amplitude of horn end oscillation. It is shown that the value of the arithmetical mean deviation of the assessed profile within the incubation period can serve as the indirect estimate of the surface plastic deformation under cavitation attack. Therefore the revealed increase of the arithmetical mean deviation of the assessed profile, corresponding to the end of the incubation period of wear, in transition from fresh water to sea one is a sign of plastisizing action of the latter. This presumption is corroborated by measurements of microhardness of the surface of the bronze BrA7MtZ15Zh3N2Tz2L in wear within the incubation period. Due to the cavitation attack in fresh water the microhardness of the bronze increased by 11 %, whereas in testing in sea water the microhardness of the bronze even decreased by 5 %. However in cavitation wear of ship propellers one probably should not anticipate the same influence of electrochemical factor as it occurs in testing on the ultrasonic vibratory apparatus, because the jets, forming in collapsing the cavitation caverns on propeller blades, have much larger diameter and the intensity of electrochemical corrosion is much lower than it is in testing on the ultrasonic vibratory apparatus. Thus, it seems unnecessary to intensify the corrosion factor by going from fresh to sea water while testing on the vibratory apparatus; otherwise the process of plastic deforming will not be equivalent to one that occurs in cavitation wear of the ship propellers.

Keywords: cavitation wear, sea water, fresh water, aluminum bronzes, ultrasonic vibratory apparatus, incubation period of wear, roughness, plastic deformation, microhardness, cold-working of metal.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., and Yevgeniy O. Gorbachenko. "Peculiarities of a change in the surface profile of aluminum bronzes in cavitation wear in sea water." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1004–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1004-1014.

УДК 629.12.037.11.004.62

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ БРОНЗ ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ИЗНАШИВАНИИ В МОРСКОЙ ВОДЕ

Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведены испытания алюминиевых бронз BrA9Ж4Н4Л и BrA7Мц15Ж3Н2Ц2Л, применяемых для изготовления судовых движителей, на кавитационное изнашивание на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе в искусственной морской воде. Интенсивность кавитационного воздействия варьировали изменением амплитуды колебаний торца концентратора вибратора от 15 до 25 мкм. Показано, что значение высотного параметра шероховатости изнашиваемой поверхности (среднего арифметического отклонения профиля), соответствующего окончанию инкубационного периода, при кавитационном изнашивании в морской воде увеличивается по сравнению с опытами в пресной воде. При этом, если в пресной воде

значение высотного параметра шероховатости, соответствующее окончанию инкубационного периода, не зависит от интенсивности кавитационного воздействия и является величиной постоянной, то в морской воде прослеживается тенденция увеличения этого значения с увеличением амплитуды колебаний торца концентратора. Показано, что значение высотного параметра шероховатости поверхности в пределах инкубационного периода может служить косвенной оценкой степени пластической деформации, поэтому увеличение значения этого параметра, соответствующего окончанию инкубационного периода, при переходе в испытаниях от пресной к морской воде может служить признаком пластифицирующего воздействия морской воды на поверхностный слой бронз при кавитационном изнашивании на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе. Высказанное предположение подтверждено также измерениями микротвердости поверхности: при испытаниях в пресной воде среднее упрочнение поверхностных слоев бронзы $BrA7Mц15Ж3H2Ц2Л$ составило 11 %, тогда как при испытаниях в морской воде микротвердость снизилась примерно на 5 %. Сделано предположение, что при кавитационном изнашивании гребных винтов в морской воде, из-за значительно большего диаметра струй, образующихся при схлопывании кавитационных каверн на лопастях, а также менее интенсивного коррозионного воздействия влияние коррозионного фактора на процесс пластического деформирования поверхностного слоя лопастей пренебрежимо мало по сравнению с условиями испытаний на ультразвуковых магнитострикционных вибраторах. Поэтому при прогнозировании продолжительности инкубационного периода методом измерения профиля поверхности дополнительная интенсификация коррозионного фактора при испытаниях на магнитострикционном вибраторе заменой пресной воды на морскую не требуется. В противном случае процесс пластического деформирования поверхности при кавитационном воздействии не будет соответствовать таковому при кавитационном изнашивании гребных винтов.

Ключевые слова: кавитационное изнашивание, морская вода, пресная вода, алюминиевая бронза, ультразвуковой магнитострикционный вибратор, инкубационный период изнашивания, шероховатость, пластическая деформация, микротвердость, упрочнение металла.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Особенности изменения профиля поверхности алюминиевых бронз при кавитационном изнашивании в морской воде / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1004–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1004-1014.

Введение (Introduction)

Изнашивание при кавитации — распространенное явление в эксплуатации различного гидрооборудования [1]–[4]. На водном транспорте кавитационный износ является частой причиной ремонта гребных винтов и их направляющих насадок [3]–[6]. На гребных винтах морских транспортных судов очаги кавитационного износа возникают на периферии лопастей [3], [6], а у двигателей быстроходных судов, в частности судов на подводных крыльях, — в основном в районе корневых сечений лопастей [6]. Очаги износа имеют губчатую рваную поверхность и в первом случае оказывают влияние на КПД гребных винтов, а во втором, являясь концентратором напряжений, могут привести к обрыву лопасти в эксплуатации, если их вовремя не устранить при ремонте. По этой причине прогнозированию кавитационного изнашивания гребных винтов уделяется серьезное внимание с позиций не только гидромеханики [7], [8], но и материаловедения [3], [9].

При кавитационном воздействии потери материала с изнашиваемой поверхности начинаются по истечении начального (инкубационного) периода. В течение этого периода вначале происходит пластическое деформирование металла до достижения предельной степени деформации, а затем его разупрочнение, характеризуемое развитием микротрещин и их слиянием, в результате чего начинается процесс отделения частиц износа [3], [4], [9]. На практике в большинстве случаев гребные винты при обнаружении очагов износа подвергаются ремонту. Поэтому актуальным является прогнозирование инкубационного периода кавитационного изнашивания и сравнение кавитационной износостойкости материалов сопоставлением продолжительностей инкубационных периодов при их изнашивании.

Для определения продолжительности инкубационного периода необходимо располагать кинетической кривой изнашивания — зависимостью потерь массы металлического материала от продолжительности кавитационного воздействия. Продолжительность инкубационного пери-

ода находят по отрезку, отсекаемому касательной, проведенной в точке максимальной скорости изнашивания, на оси абсцисс [10]. Такие эксперименты отличаются большой продолжительностью и трудоемкостью. Поэтому целесообразной является разработка методик ускоренных испытаний для оценки продолжительности инкубационного периода.

Проведенные эксперименты в пресной воде показали [11], что значение высотного параметра шероховатости, например среднего арифметического отклонения профиля R_a (ГОСТ 25142-82), увеличивается линейно с увеличением продолжительности кавитационного воздействия в пределах инкубационного периода, при этом значение R_a , соответствующее окончанию инкубационного периода, является величиной постоянной, не зависящей от интенсивности кавитационного воздействия при изнашивании одного и того же сплава на конкретной лабораторной установке или в конкретном оборудовании. Выявленные особенности кинетики изменения неровностей поверхности при кавитационном изнашивании позволяют осуществлять прогнозирование продолжительности инкубационного периода с использованием метода измерения профиля поверхности. Однако многие виды оборудования эксплуатируются в коррозионно-активных жидкостях, например, гребные винты и направляющие насадки морских судов, вопрос же, касающийся сохранения указанных закономерностей при изнашивании в условиях существенного влияния коррозии, ранее не исследовался и поэтому является актуальным.

Целью работы является исследование возможности прогнозирования продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания сплавов, применяемых для изготовления гребных винтов, с использованием метода измерения профиля поверхности при испытании в морской воде.

Методика эксперимента (Experimental Technique)

Кавитационное изнашивание осуществлялось на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе (МСВ) [3] при частоте колебаний концентратора, равной примерно 22 кГц. Интенсивность кавитационного воздействия варьировали изменением амплитуды колебаний торца концентратора от 15 до 25 мкм. Амплитуду колебаний измеряли с помощью вихретокового датчика, затем по результатам измерений строили калибровочный график зависимости амплитуды колебаний торца концентратора от выходной мощности ультразвукового излучателя.

Для испытания выбрали две бронзы, широко применяемые для литья гребных винтов: алюминий-никелевую БрА9Ж4Н4Л и марганцево-алюминиевую БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л. Образцы вырезали из лопастей гребных винтов, бывших в эксплуатации. Образцы имели цилиндрическую форму диаметром около 17 мм. Изнашиванию подвергали торцевые поверхности цилиндров, которые предварительно шлифовали на шкурках разной зернистости, а затем полировали на сукне. Расстояние между поверхностью образца и торцом концентратора в опытах выставляли равным 0,5 мм.

В качестве жидкости для экспериментов использовали искусственную морскую воду следующего состава: NaCl — 2,46 % (по массе); KCl — 0,067 %; CaCl₂ · 2H₂O — 0,136 %; MgSO₄ · 7H₂O — 0,629 %; MgCl₂ · 6H₂O — 0,466 %; NaHCO₃ — 0,018 %.

В процессе испытаний МСВ периодически выключали, образцы вынимали из емкости с морской водой, промывали в мягкой пресной воде, высушивали и взвешивали на аналитических весах ВЛР-200, имеющих дискретность показаний 0,05 мг, и по потерям массы определяли износ.

После взвешивания проводили измерения шероховатости на приборе MarSurf PS1. В результате измерений регистрировали значение высотного параметра R_a . Базовую длину (0,8 мм) выбирали таким образом, чтобы полная длина отрезка трассирования (5,6 мм) была меньше диаметра очага износа. Длина оценки (4,0 мм) при этом равнялась пяти базовым длинам. При каждом измерении в пределах очага проводили три отрезка трассирования и на каждом определяли значение R_a .

Результаты экспериментов (Experimental results)

По результатам измерений строили зависимости потерь массы ΔM и параметра шероховатости R_a от продолжительности кавитационного воздействия t (рис. 1). Продолжительность инкуба-

ционного периода определяли по кривой $\Delta M(t)$ как отрезок, отсекаемый на оси абсцисс, касательной к этой кривой, проведенной через точку максимальной скорости изнашивания.

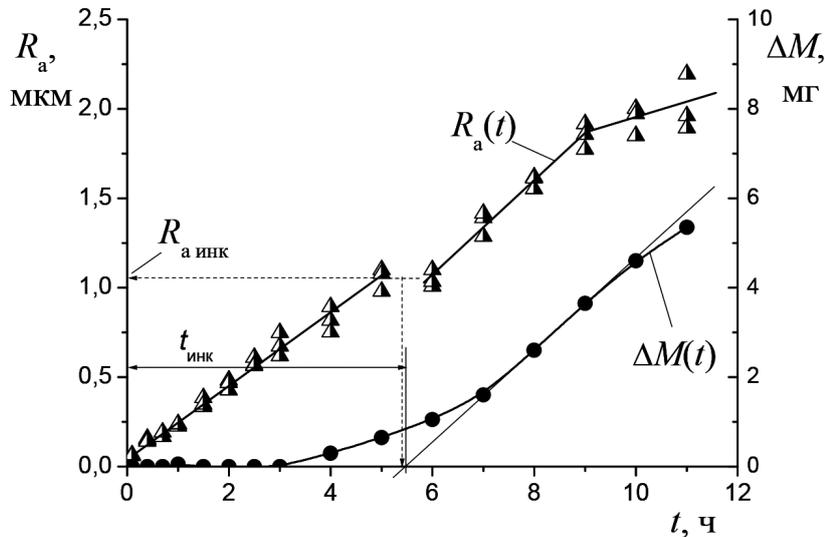


Рис. 1. Изменение шероховатости поверхности и потерь массы образца из бронзы БрА9Ж4Н4Л в зависимости от продолжительности кавитационного воздействия на МСВ в морской воде при амплитуде колебаний торца концентратора 25 мкм

Ранее при испытании в пресной воде отмечалось, что завершение инкубационного периода сопровождается появлением на зависимости $R_a(t)$ характерных особенностей в виде разрывов и / или переломов [11]. Аналогичные особенности в кинетике изменения параметра шероховатости были отмечены и при кавитационном изнашивании в морской воде. Как видно из рис. 1, в момент, соответствующий окончанию инкубационного периода, на зависимости $R_a(t)$ образовался разрыв. Также были отмечены случаи появления не разрыва, а перелома или перегиба.

В процессе обработки полученных зависимостей $R_a(t)$ определяли значения R_a , соответствующие наступлению переломов или разрывов на зависимости $R_a(t)$, т. е. окончанию инкубационного периода — $R_{a,инк}$, и строили зависимости $R_{a,инк}$ от амплитуды колебаний торца концентратора МСВ (рис. 2 и 3).

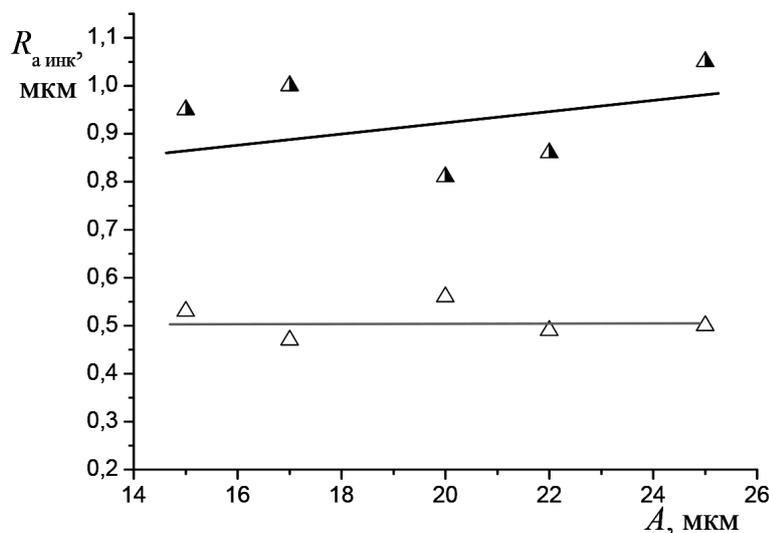


Рис. 2. Изменение параметра R_a шероховатости поверхности, соответствующего окончанию инкубационного периода кавитационного изнашивания, при испытании бронзы БрА9Ж4Н4Л на МСВ в зависимости от амплитуды колебаний торца концентратора
 Условные обозначения: \triangle — пресная вода; \blacktriangle — морская вода

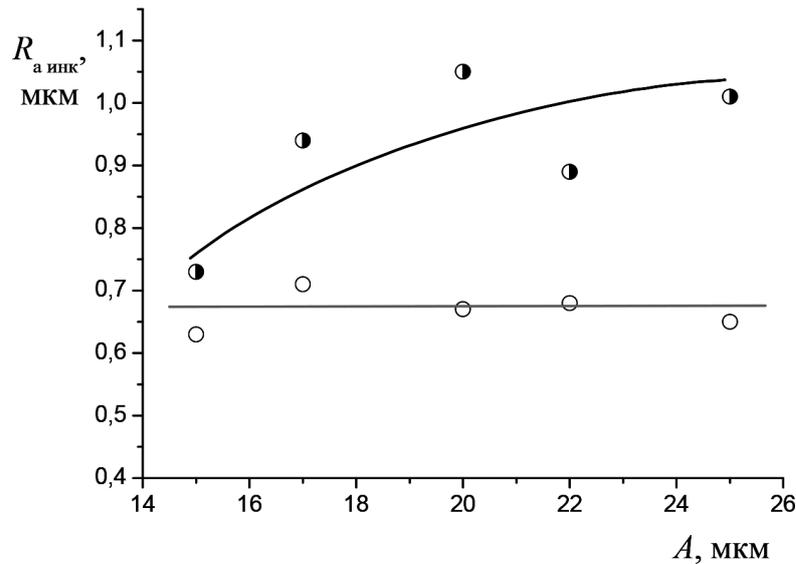


Рис. 3. Изменение параметра R_a шероховатости поверхности, соответствующего окончанию инкубационного периода кавитационного изнашивания, при испытании бронзы БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л на МСВ в зависимости от амплитуды колебаний торца концентратора
Условные обозначения: ○ — пресная вода; ● — морская вода

Анализ результатов экспериментов (Analysis of Experimental Results)

Из сравнения зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, можно сделать вывод о двух отличиях между результатами испытаний в пресной и морской воде. Во-первых, если при кавитационном изнашивании в пресной воде значение среднего арифметического отклонения профиля $R_{a,инк}$, соответствующее окончанию инкубационного периода, оказалось постоянным и не зависящим от интенсивности кавитационного воздействия, то в морской воде прослеживается тенденция увеличения этого значения с увеличением амплитуды колебаний торца концентратора; особенно выражено это проявляется для бронзы БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л. Во-вторых, значения $R_{a,инк}$, полученные при испытаниях в морской воде, в среднем в 1,5 раза превышают таковые, полученные при изнашивании в пресной воде.

Тот факт, что при испытаниях в пресной воде значение $R_{a,инк}$ оказалось нечувствительным к амплитуде колебаний торца концентратора, можно объяснить тем, что высота неровностей, появляющихся на поверхности в пределах инкубационного периода, может служить косвенным показателем степени пластической деформации поверхностных слоев. С увеличением высоты неровностей возрастает также длина профиля поверхности. Если в грубом приближении принять, что два компонента главных деформаций: e_r и e_t , лежат в плоскости поверхности, а третий e_z направлен перпендикулярно этой поверхности, то можно оценить порядок пластических деформаций к концу инкубационного периода по следующей формуле:

$$e_i = 2e_r = 2e_t = 2 \ln \frac{L_{инк}}{L_0}, \quad (1)$$

где e_i — интенсивность деформаций поверхностных слоев к концу инкубационного периода; L_0 — длина профиля исходной поверхности, на которую впоследствии оказывается кавитационное воздействие; $L_{инк}$ — длина профиля поверхности к концу инкубационного периода кавитационного изнашивания.

Разрушение поверхности при кавитационном воздействии имеет квазистатический характер [3], т. е. от цикла к циклу происходит накопление пластических деформаций. Изменение интенсивности кавитационного воздействия оказывает влияние лишь на скорость накопления пластических деформаций, при этом значение деформации, соответствующее началу разрушения, должно

оставаться постоянным, а поэтому значение $R_{a.инк}$ как мера указанной критической степени деформации не должно изменяться.

Увеличение высоты неровностей в результате перехода к кавитационному воздействию в морской воде означает увеличение длины профиля поверхности и, согласно выражению (1), увеличение пластической деформации. Т. е. увеличение высоты неровностей, соответствующих концу инкубационного периода, можно объяснить пластифицированием поверхностных слоев при воздействии коррозионной среды. Иными словами, имеет место *хемомеханический эффект* [12] как результат совместного действия в искусственной морской воде механического (кавитационных микроударов) и химического (электрохимической коррозии) факторов.

Поясним причину пластифицирующего влияния морской воды. Кавитационное изнашивание определяется совместным действием коррозионного и механических факторов. Эти два фактора имеют различную природу. Механический фактор зависит от размера кавитационной каверны и, как следствие, от размера объекта, у поверхности которого возникает кавитационная каверна, в то время как коррозионное воздействие на поверхность от размера объекта не зависит. В настоящее время используют в основном две модели, объясняющие механическое воздействие при кавитации. В соответствии с первой моделью на поверхность материала воздействуют ударные волны [13], генерируемые схлопывающимися пузырьками, в соответствии со второй — кумулятивные струйки [14]. Для упрощения анализа примем за основную вторую модель.

Пусть при кавитационном изнашивании в пресной воде, когда можно не учитывать коррозионный фактор, от воздействия кумулятивной струи диаметром d_c при схлопывании каверны в материале образуется зона пластической деформации, достигающая к концу инкубационного периода глубины $d_{пл}$ (рис. 4). Далее предположим, что материал находится в морской воде и на его поверхность оказывается кавитационное воздействие, при этом толщина слоя, удаленного с поверхности под действием коррозии за время, равное инкубационному периоду, составит $d_{кор}$. При одновременном воздействии коррозионного и механического факторов, наряду с повышением плотности дислокаций в поверхностном слое при его пластическом деформировании, в то же время под действием коррозии будет происходить стравливание слоя, насыщенного дислокациями, что создает условия для разрушения ранее сформировавшихся на некоторой глубине плоских скоплений дислокаций и, как следствие, для релаксации микронапряжений и разупрочнения. Ранее изложенное подтверждается измерениями микротвердости бронзы БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л.

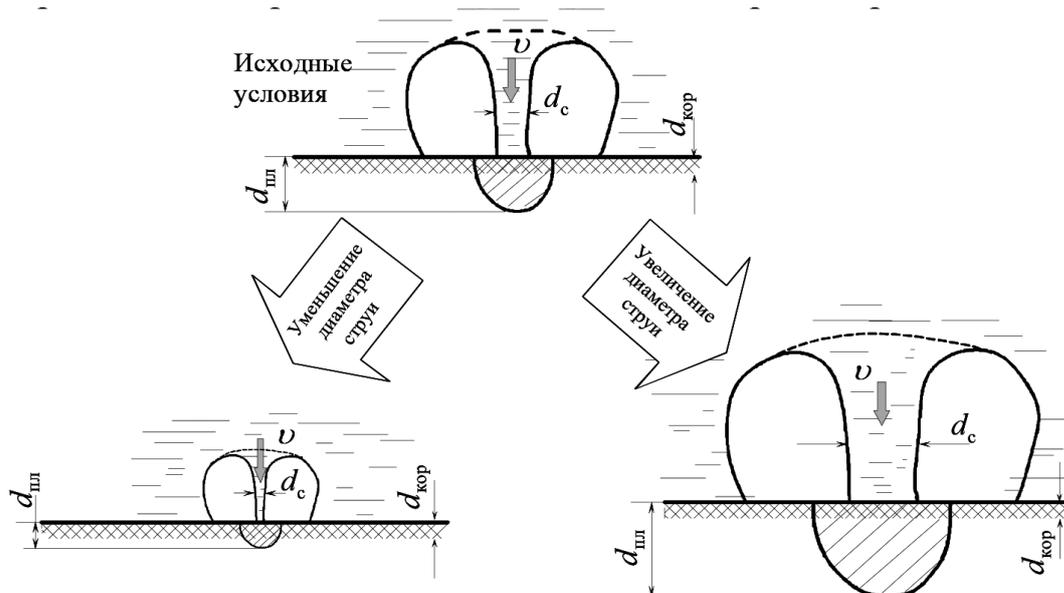


Рис. 4. Влияние диаметра микроструй при схлопывании кавитационных каверн на величину соотношения механического и коррозионного факторов, условно выражаемых через глубину наклепа $d_{пл}$ и толщину слоя $d_{кор}$, удаленного в результате коррозии

На рис. 5 приведена кинетика упрочнения поверхностных слоев бронзы — зависимость микротвердости от продолжительности кавитационного воздействия в течение инкубационного периода. Среднее значение микротвердости в течение инкубационного периода при испытании в морской воде составило 1512 МПа, тогда как исходная микротвердость поверхности составляла 1591 МПа, т. е. микротвердость снизилась на 5 % (произошло даже некоторое разупрочнение). При испытании в пресной воде среднее значение микротвердости в течение инкубационного периода составило 1681 МПа, т. е. по сравнению со значением 1515 МПа, соответствующим исходной поверхности, упрочнение составило 11 %.

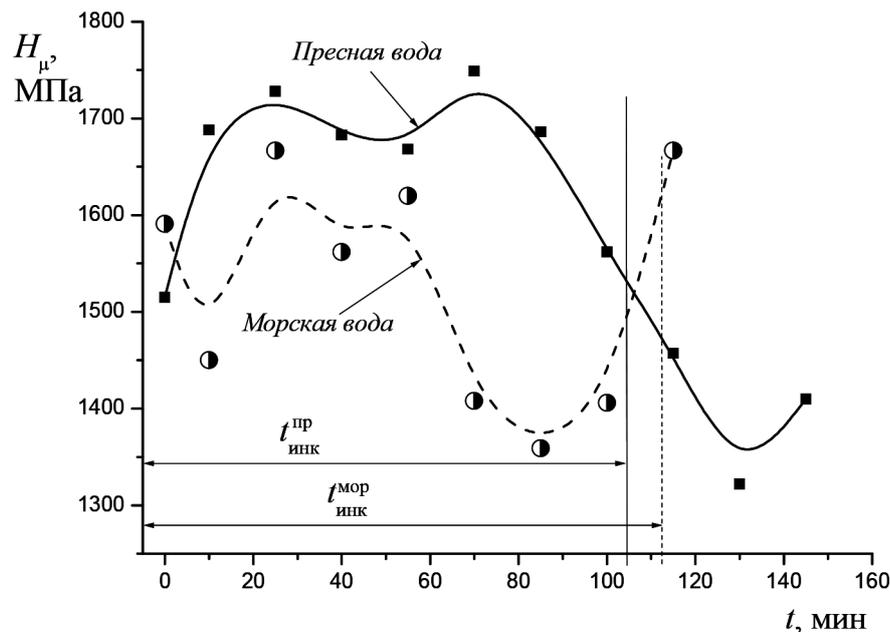


Рис. 5. Кинетика упрочнения бронзы БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л в течение инкубационного периода при изнашивании в пресной и морской воде:

$t_{инк}^{пр}$ и $t_{инк}^{мор}$ — продолжительность инкубационного периода в пресной и морской воде

Стравливание упрочненных слоев приводит к тому, что зона максимальных пластических деформаций формируется на большей глубине, а значит, при испытании в морской воде должна возрасти и продолжительность инкубационного периода по сравнению с испытаниями в пресной. Действительно, значения инкубационного периода, полученные осреднением по всем амплитудам (так как на каждой амплитуде было испытано только по одному образцу), представленные в таблице, для морской воды больше, чем для пресной, как для бронзы БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л, так и для бронзы БрА9Ж4Н4Л.

Продолжительность инкубационного периода, определенная по зависимостям $R_a(t)$, при испытаниях в пресной и морской воде, ч

A, мкм	БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л		БрА9Ж4Н4Л	
	пресная вода	морская вода	пресная вода	морская вода
15	3,1	2,1	6,3	8,45
17	2,0	2,5	5,4	8,45
20	1,2	2,3	2,9	4,6
22	1,2	1,9	2,9	4,45
25	1,9	1,7	4,6	5,45
Среднее	1,88	2,1	4,42	6,28

Известно, что при внедрении в поверхность шарового индентора максимальные касательные напряжения возникают не на поверхности, а на некоторой глубине [15], а значит, первые пласти-

ческие деформации появляются также на некоторой глубине под поверхностью. Если уподобить внедрение струи жидкости при схлопывании кавитационной каверны внедрению в поверхность шарового индентора, то можно предположить, что и для случая кавитационного воздействия максимальные пластические деформации возникают на некоторой глубине под поверхностью, и в этих же местах появляются первые трещины. Это подтверждается исследованием остаточных напряжений в поверхностных слоях при кавитационном воздействии, проведенным с использованием рентгеновского метода [16].

Рассмотрим два случая. 1-й случай — если $d_{пл} \approx d_{кор}$ (см. рис. 4, внизу слева), то в поверхностных слоях не успеет произойти накопление пластических деформаций критической величины, так как наклепанные слои будут стравливаться при электрохимическом действии морской воды. В этом случае, по-видимому, будет реализовываться процесс эрозионной коррозии. 2-й случай — если $d_{пл} \gg d_{кор}$ (см. рис. 4, внизу справа), то влияние коррозии можно не учитывать, так как ее скорость очень мала для того, чтобы достичь зоны максимальных касательных деформаций под поверхностью. При достижении критической степени деформации в этой зоне образуются трещины, которые сливаются, выходят на поверхность и в результате происходит отделение частиц износа вместе с продуктами коррозии поверхностного слоя. Однако в действительности влияние морской воды на механические свойства металлов при ультразвуковой кавитации значительно сложнее. Бронза БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л имеет более низкую коррозионную стойкость в морской воде, чем БрА9Ж4Н4Л.

Эксперименты показали, что при амплитуде 25 мкм коррозионные потери бронзы БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л к концу инкубационного периода составили около 0,29 мм³, что соответствует толщине слоя, равного примерно 2,2 мкм, тогда как коррозионные потери бронзы БрА9Ж4Н4Л в течение инкубационного периода с точностью, обеспечиваемой аналитическими весами, равны нулю (см. рис. 1). Однако влияние морской воды на увеличение продолжительности инкубационного периода изнашивания в случае бронзы БрА9Ж4Н4Л существенно заметнее, чем для бронзы БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л (см. таблицу), хотя, казалось бы, должно быть наоборот. По всей видимости, даже при отсутствии заметных коррозионных потерь материала в морской воде последняя все равно оказывает на поверхностные слои сильное пластифицирующее воздействие. Возможно, это пластифицирующее воздействие усиливается при пропускании в воде ультразвука, так как известно, что область жидкости в окрестности схлопывающихся пузырьков является зоной, в которой интенсифицируются различные химические процессы [17], [18], и в частности такая кавитационная обработка позволяет существенно увеличить концентрацию кислорода.

Действительно, опыты на медных сплавах БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л и ЛЦ40Мц3Ж, коррозионная стойкость которых уступает бронзе БрА9Ж4Н4Л и поэтому их коррозионные потери было легко измерить, показали, что в условиях ультразвукового воздействия в морской воде при амплитуде колебаний торца концентратора МСВ, равной 25 мкм, скорость их коррозии составила примерно 1 мкм/ч. Скорость латуней и алюминиевых бронз в движущейся со скоростью 20 м/с морской воде более чем на порядок ниже и составляет около 0,05–0,1 мкм/ч [19]. Для того чтобы процесс пластического деформирования при изнашивании в лабораторных условиях был адекватен условиям кавитационного изнашивания гребных винтов, необходимо, чтобы выполнялось равенство

$$\left(\frac{d_{кор}}{d_{пл}} \right)_{лаб} = \left(\frac{d_{кор}}{d_{пл}} \right)_{ГВ}, \quad (2)$$

где индексы «лаб» и «ГВ» — условия изнашивания на лабораторной установке и гребных винтов соответственно.

Причем в выражении (2) величину $d_{кор}$ надо понимать не просто как толщину слоя, удаленного при коррозии, а в более широком смысле как толщину слоя, пластифицированного под действием коррозии. Точный механизм этого пластифицирующего действия еще предстоит выяснить. Очень важно знать, является ли это особенностью испытаний на ультразвуковых МСВ или может

проявляться и на лабораторных установках других типов. Таким образом, основываясь на результатах, представленных на рис. 2–5 и в таблице, можно утверждать, что применительно к испытаниям на МСВ равенство (2) не соблюдается, и выполняется условие:

$$\left(\frac{d_{\text{кор}}}{d_{\text{пл}}} \right)_{\text{лаб}} \gg \left(\frac{d_{\text{кор}}}{d_{\text{пл}}} \right)_{\text{ГВ}} .$$

Указанное неравенство обусловлено, во-первых, существенной разницей в порядке величин $d_{\text{пл}}$ — для условий испытаний бронз на МСВ $d_{\text{пл.лаб}} \approx 10$ мкм, тогда как для условий эксплуатации гребных винтов морских судов из бронзы $d_{\text{пл.ГВ}} \approx 10$ мм; и, во-вторых, существенной интенсификацией коррозионного действия морской воды в условиях ультразвуковой кавитации.

Таким образом, можно предположить, что в отличие от МСВ на гребных винтах пластифицирующее влияние морской воды при кавитационном изнашивании не будет оказывать существенного влияния, и этим влиянием можно пренебречь. Поэтому при использовании метода измерения профиля поверхности для прогнозирования продолжительности инкубационного периода дополнительная интенсификация коррозионного фактора при испытаниях на МСВ заменой пресной воды на морскую является, по всей видимости, излишней.

Выводы (Summary)

1. Значение среднего арифметического отклонения профиля R_a , соответствующего окончанию инкубационного периода, при кавитационном изнашивании на ультразвуковом МСВ в морской воде увеличивается по сравнению с опытами в пресной воде. При этом, если в пресной воде значение R_a , соответствующее окончанию инкубационного периода, не зависит от интенсивности кавитационного воздействия и является величиной постоянной, то в морской воде прослеживается тенденция увеличения этого значения с увеличением амплитуды колебаний торца концентратора.

2. Увеличение значения R_a , соответствующего окончанию инкубационного периода, при переходе от испытаний в пресной к испытаниям в морской воде может служить признаком пластифицирующего воздействия морской воды на поверхностный слой бронз при кавитационном изнашивании на ультразвуковом МСВ. Причина этого заключается в очень малой толщине поверхностного слоя, подвергающегося пластической деформации, и интенсивном воздействии электрохимической коррозии, усиливаемом в условиях ультразвуковой кавитации.

3. Можно предположить, что при кавитационном изнашивании гребных винтов, эксплуатирующихся в морской воде, из-за значительно большего диаметра струй, образующихся при схлопывании кавитационных каверн на лопастях, а также менее интенсивного коррозионного воздействия, влияние коррозионного фактора на процесс пластического деформирования поверхностного слоя лопастей пренебрежимо мало по сравнению с условиями испытаний на ультразвуковом МСВ. Поэтому при прогнозировании продолжительности инкубационного периода методом измерения профиля поверхности дополнительная интенсификация коррозионного фактора при испытаниях на МСВ с помощью замены пресной воды на морскую не требуется. В противном случае процесс пластического деформирования поверхности при кавитационном воздействии не будет соответствовать идентичному процессу при кавитационном изнашивании гребных винтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sreedhar B. K. Cavitation damage: Theory and measurements – A review / B. K. Sreedhar, S. K. Albert, A. V. Pandit // Wear. — 2017. — Vol. 372–373. — Pp. 177–196. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.009.
2. Петров А. И. Исследование сравнительной стойкости и кавитационной эрозии образцов материалов и покрытий проточной части гидромашин / А. И. Петров, М. М. Скобелев, А. Г. Ханьчев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. — 2015. — № 2 (101). — С. 128–137.

3. Цветков Ю. Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
4. Фомин В. В. Гидроэрозия металлов / В. В. Фомин. — М.: Машиностроение, 1977. — 287 с.
5. Быстрицкий В. В. Эрозионный износ направляющих насадок / В. В. Быстрицкий // Труды ЛИВТ. — 1972. — № 135. — С. 26–39.
6. Георгиевская Е. П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е. П. Георгиевская. — Л.: Судостроение, 1978. — 206 с.
7. Boorsma A. Understanding the Details of Cavitation / A. Boorsma, S. Whitworth // Proceedings of the Second International Symposium on Marine Propulsors (Smp'11). — Hamburg, Germany, 2011. — Pp. 319–327.
8. Ponkratov D. DES Prediction of Cavitation Erosion and Its Validation for a Ship Scale Propeller / D. Ponkratov // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2015. — Vol. 656. — Pp. 012055. DOI: 10.1088/1742-6596/656/1/012055.
9. Погодаев Л. И. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования / Л. И. Погодаев, П. А. Шевченко. — Л.: Судостроение, 1984. — 264 с.
10. ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device. — ASTM International, 2010. — 19 p.
11. Горбаченко Е. О. Кинетика изменения профиля поверхности алюминиевых бронз при кавитационном изнашивании / Е. О. Горбаченко, Ю. Н. Цветков // Трение и износ. — 2018. — Т. 39. — № 3. — С. 277–282.
12. Гутман Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии / Э. М. Гутман. — М.: Metallurgia, 1981. — 271 с.
13. Прис К. М. Кавитационная эрозия / К. М. Прис / в кн. Эрозия: пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — С. 269–330.
14. Аганин А. А. Схлопывание кавитационного пузырька в жидкости вблизи твердой стенки / А. А. Аганин [и др.]. — Вестник Башкирского университета. — 2013. — Т. 18. — № 1. — С. 15–21.
15. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению / С. В. Пинегин. — М.: Машиностроение, 1969. — 243 с.
16. Terauchi Y. Correlation of cavitation damage tests with residual stress measurements / Y. Terauchi, H. Matsuura, M. Kitamura // Bulletin of the JSME. — 1973. — Vol. 16. — No. 102. — Pp. 1829–1838. DOI: 10.1299/jsmel958.16.1829.
17. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция / В. А. Маргулис. — М.: Химия, 1986. — 288 с.
18. Эльпинер И. Е. О механизме химического действия ультразвуковых волн (обзор) / И. Е. Эльпинер // Акустический журнал. — 1959. — Т. V. — № 2. — С. 133–145.
19. Богорад И. Я. Коррозия и защита морских судов / И. Я. Богорад [и др.]. — Л.: Судостроение, 1973. — 392 с.

REFERENCES

1. Sreedhar, B. K., S. K. Albert, and A. B. Pandit. “Cavitation damage: Theory and measurements – A review.” *Wear* 372–373 (2017): 177–196. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.009
2. Petrov, A. I., M. M. Skobelev, and A. G. Khanychev. “Study of comparative resistance to cavitation erosion of material samples and coatings in the hydraulic machine flow sections.” *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering* 2(101) (2015): 128–137.
3. Tsvetkov, Yu. N. *Kavitatsionnoe iznashivanie metallov i oborudovaniya*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003.
4. Fomin, V. V. *Gidroeroziya metallov*. M.: Mashinostroenie, 1977.
5. Bystritskii, V. V. “Eroziionnyi iznos napravlyayushchikh nasadok.” *Trudy LIVT* 135 (1972): 26–39.
6. Georgievskaya, E. P. *Kavitatsionnaya eroziya grebnykh vintov i metody bor'by s nei*. L.: Sudostroenie, 1978.
7. Boorsma, Anne, and Stewart Whitworth. “Understanding the details of cavitation.” *Second International Symposium on Marine Propulsors*. Hamburg, Germany, 2011. 319–327.
8. Ponkratov, Dmitriy. “DES Prediction of Cavitation Erosion and Its Validation for a Ship Scale Propeller.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 656. IOP Publishing, 2015. DOI: 10.1088/1742-6596/656/1/012055.
9. Pogodaev, L. I., and P. A. Shevchenko. *Gidroabrazivnyi i kavitatsionnyi iznos sudovogo oborudovaniya*. L.: Sudostroenie, 1984.

10. *ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device*. ASTM International, 2010.
11. Gorbachenko, E. O., and Yu. N. Tsvetkov. "Kinetics of Change in Surface Profile of Aluminum Bronzes in Cavitation Wear." *Journal of Friction and Wear* 39.3 (2018): 277–282.
12. Gutman, E. M. *Mekhanokhimiya metalllov i zashchita ot korrozii*. M.: Metallurgiya, 1981.
13. Pris, K. M. "Kavitatsionnaya eroziya." *Eroziya*. Translate from Eng. M.: Mir, 1982. 269–330.
14. Aganin, A. A., M. A. Ilgamov, L. A. Kosolapova, and V. G. Malakhov. "Collapse of A cavitation bubble in fluid near RIGID wall." *Bulletin of Bashkir University* 18.1 (2013): 15–21.
15. Pinegin, S. V. *Kontakt'naya prochnost' i soprotivlenie kacheniyu*. M.: Mashinostroenie, 1969.
16. Terauchi, Yoshio, Hiroshi Matuura, and Minoru Kitamura. "Correlation of cavitation damage tests with residual stress measurements." *Bulletin of JSME* 16.102 (1973): 1829–1839. DOI: 10.1299/jsme1958.16.1829
17. Margulis, M. A. *Zvukokhimicheskie reaktsii i sonolyuminestsentsiya*. M.: Khimiya, 1986.
18. El'piner, I. E. "O mekhanizme khimicheskogo deistviya ul'trazvukovykh voln (obzor)." *Akusticheskii zhurnal* V.2 (1959): 133–145.
19. Bogorad, I. Ya., E. V. Iskra, V. A. Klimova, and Yu. L. Kuz'min. *Korroziya i zashchita morskikh sudov*. L: Sudostroenie, 1973.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7.
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Горбаченко Евгений Олегович — аспирант
Научный руководитель:
Цветков Юрий Николаевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7.
e-mail: jenyraqwerty@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov, Yuriy N. —
Doctor of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Gorbachenko, Yevgeniy O. — Postgraduate
Supervisor:
Tsvetkov, Yuriy N.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: jenyraqwerty@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.
Received: September 17, 2018.*