

ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННОГО ФАКТОРА НА КАВИТАЦИОННУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СПЛАВОВ ДЛЯ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ

Ю.Н. Цветков

*Государственный университет морского и речного флота
им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2089-1299>*

Е.О. Горбаченко

*Государственный университет морского и речного флота
им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4117-3341>*

Р.Н. Ларин

*Государственный университет морского и речного флота
им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Исследована кавитационная износостойкость нержавеющей стали 08X14НДЛ, бронзы БрА8Мц11ЖЗН2Л и латуни ЛЦ40Мц3Ж в пресной воде и морской воде разных составов. опыты проводились на магнитострикционном вибраторе при частоте колебаний концентратора около 22 кГц; амплитуду колебаний его торца можно было варьировать от 12 до 27 мкм, расстояние между торцом концентратора и поверхностью образцов равнялась 0,5 мм. Показано, что с увеличением амплитуды колебаний торца концентратора отношение износа в морской воде к износу в пресной воде снижается. На примере латуни продемонстрировано, что в жестких условиях кавитационного воздействия, которым соответствуют испытания на магнитострикционном вибраторе при амплитуде колебаний равной 27 мкм, кавитационный износ в морской воде может быть существенно ниже, чем в пресной. Указанный парадокс объясняется, по всей видимости, особенностями испытаний на ультразвуковых магнитострикционных вибраторах в сочетании с пластифицирующим действием агрессивной жидкости. Ультразвуковая частота воздействия на поверхность ударных волн увеличивает подвижность дислокаций, а травливание поверхностных слоёв в морской воде облегчает их разрядку на поверхности: имеет место хемомеханический эффект.

Ключевые слова: кавитационное изнашивание, металлический сплав, гребной винт, ультразвуковой магнитострикционный вибратор, морская вода, пресная вода, микротвёрдость, хемомеханический эффект.

1. Введение

Кавитационное изнашивание – одна из распространённых причин ремонта элементов судовых движительных комплексов: гребных винтов и направляющих насадок [1]. Особенность кавитационного изнашивания гребных винтов (ГВ) в том, что часто оно происходит в морской воде, являющейся сильным электролитом, поэтому наряду с кавитационным воздействием металлическая поверхность подвергается электрохимической коррозии. Этим объясняется тот факт, что при проведении лабораторных испытаний сплавов ГВ на кавитационную износостойкость для воспроизведения коррозионного действия используют не пресную, а искусственную морскую воду, состав которой варьируют от простейших водных растворов $NaCl$ разных концентраций до сложных композиций, сравнительно точно воспроизводящих состав морской воды [2, 3].

Следует отметить, что в опытах на электрохимическую коррозию вместо морской воды часто используют 3,5% раствор $NaCl$, который, к примеру, по отношению к углеродистой стали, показал себя в несколько раз более агрессивным, чем морская вода [4]. Это связано с присутствием в морской воде ионов Ca^{+2} и Mg^{+2} , которые способствуют образованию на поверхности известковых осадков, препятствующих диффузии кислорода к поверхности [5]. Однако не для всех сплавов это так, например, для алюминиевой латуни морская вода, наоборот, более агрессивна, чем 3,5 % раствор $NaCl$, что, по-видимому, объясняется недостаточно сильным изменением pH в слое воды у поверхности латуни для образования известковых осадков [6]. При кавитационном изнашивании, в отличие от коррозии, металлическая поверхность подвергается совместному действию механического и коррозионного факторов. Кавитационное воздействие препятствует образованию на поверхности отложений из продуктов коррозии, поэтому в условиях кавитации коррозионное воздействие растворов неорганических солей отличается от коррозии в статических условиях. Например, дуплексная нержавеющая сталь для гребных винтов имеет более высокую коррозионную стойкость в 3,5% водном растворе $NaCl$, чем алюминиево-никелевая бронза, но при одновременном кавитационном воздействии бронза показывает более высокую коррозионную стойкость, чем нержавеющая сталь [7]. При этом при одновременном действии коррозии и механического фактора возникает синергетический эффект [7], проявляющийся по-разному на разных сплавах.

В настоящее время отсутствуют методические основы, позволяющие в точности воспроизводить в лабораторных условиях такой же механизм разрушения поверхности при совместном действии механического и коррозионного факторов, какой имеет место при кавитационном изнашивании натуральных объектов. Считается, что из-за кратковременности лабораторных опытов, по сравнению с условиями кавитационного изнашивания натуральных объектов, в этих опытах не в полной мере проявляется влияние коррозии на кавитационный износ. В разное время предлагались различные способы учёта коррозионного фактора: сочетанием периодов кавитационного воздействия с более продолжительными периодами статической выдержки образцов в жидкости [8, 9], снижением интенсивности кавитационного воздействия при постоянном уровне коррозионной активности жидкости [10] или наоборот, интенсификацией электрохимической коррозии с помощью анодной поляризации образца при постоянном уровне механического воздействия [11–14]. Однако у всех этих способов один общий недостаток: при их использовании добиваются одинакового соотношения потерь металла от коррозионного и механического факторов, не обращая внимания на обеспечение одинаковой природы разрушения поверхности металла в натуральных условиях и лаборатории [10]. Проблема осложняется разнообразием типов установок, применяемых для испытаний на кавитационный износ [15], причём в пределах каждого типа они могут различаться по своим параметрам. На каждой установке могут проявляться свои специфические особенности. В последнее время в большинстве случаев используются ультразвуковые магнитострикционные вибраторы (МСВ) [16], как правило, с частотой колебаний концентратора в диапазоне от 18 до 22 кГц.

Ультразвуковые МСВ обладают рядом преимуществ, которые обеспечили им широкое распространение. Однако при испытании на МСВ с применением искусственной морской воды на некоторых режимах получаются результаты, которые трудно объяснить, в частности, такие, как увеличение износа при переходе от испытаний в искусственной морской к испытаниям в пресной воде. Проявлению таких эффектов способствуют следующие факторы: 1) ультразвуковая частота; по всей видимости, она оказывает влияние на механизм упрочнения и разрушения поверхности металла; 2) малая толщина поверхностного слоя, пластически деформируемого при испытании на ультразвуковом МСВ из-за малого размера кавитационной зоны и 3) коррозионное воздействие на поверхность. Строго говоря, ни один из перечисленных факторов нельзя рассматривать изолированно, так как они действуют одновременно. Тем не менее, влияние первых двух факторов на поведение испытываемых на МСВ металлов выражено проявляется только при наличии агрессивной среды.

Целью настоящей работы является исследование влияния электрохимической коррозии на кавитационную износостойкость сплавов, применяемых для ГВ, в условиях ультразвуковой кавитации.

2. Методика эксперимента

Кавитационное изнашивание осуществляли на ультразвуковом МСВ при частоте колебаний концентратора, равной примерно 22 кГц (рис. 1). Образец 1 устанавливали в оправку 2 и крепили винтом 3. Саму оправку устанавливали в ёмкость 4, в которую заливали воду 5. Амплитуду колебаний торца концентратора 6, определяющую интенсивность кавитационного воздействия, можно было варьировать примерно от 12 до 27 мкм.

Для испытания выбрали три сплава: бронзу «Новостон» (БрА8Мц11Ж3Н2Л), латунь ЛЦ40Мц3Ж и сталь 08Х14НДЛ. Образцы из стали вырезали из лопасти гребного винта, бывшего в эксплуатации, они имели цилиндрическую форму диаметром около 17 мм. Латунь и бронзу отливали в электропечи, а образцы, вырезанные из отливки, представляли собой призмы квадратного сечения размером 15×15×8.

Плоские поверхности образцов, подвергаемые кавитационному воздействию, перед испытаниями шлифовали на шкурках разной зернистости, а потом полировали на сукне. Расстояние Z между поверхностью образца и торцом концентратора (рис. 1) в опытах выставляли равным 0,5 мм.

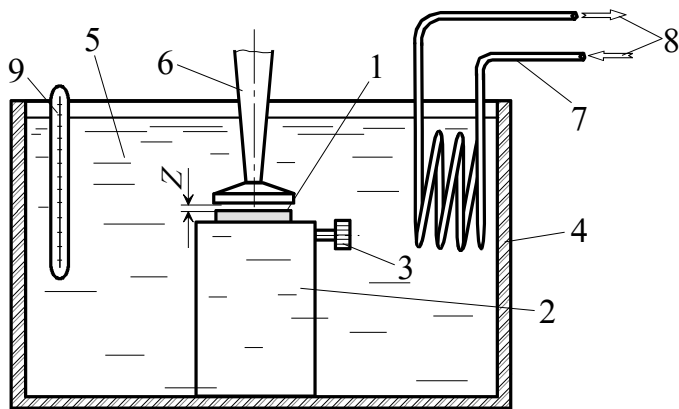


Рис. 1. Схема испытаний на кавитационную износостойкость

В процессе испытаний воду в ёмкости охлаждали с помощью змеевика 7, через который пропускали водопроводную воду 8. Температуру поддерживали равной 20 ± 3 °С и контролировали с помощью термометра 9.

Эксперименты проводили в мягкой пресной воде, 3 % водном растворе $NaCl$ и искусственной морской воде (см. таблицу).

В процессе испытаний МСВ периодически выключали, образцы вынимали из рабочей ёмкости, промывали в мягкой пресной воде, высушивали и взвешивали на аналитических весах ВЛР-200, имеющих дискретность показаний 0,05 мг. По потерям массы определяли износ. На каждом режиме испытывали по два образца, а за окончательный результат брали среднее арифметическое значение.

3. Анализ результатов экспериментов

Первая серия опытов состояла в сравнительных испытаниях сплавов в пресной воде и в 3 % растворе $NaCl$. Как следует из работы [9], стойкость металлов к кавитационному воздействию снижается при повышении содержания $NaCl$ в воде, однако при превышении концентрацией значения, равного 3 %, дальнейшее повышение содержания хлорида натрия не приводит к заметному увеличению износа. То есть, наименьшая кавитационная износостойкость из всех растворов, моделирующих морскую воду, получается в водных растворах, содержащих от трёх и более процентов $NaCl$.

По результатам первой серии опытов было установлено, что для всех сплавов, указанных в предыдущем разделе, с увеличением амплитуды колебаний отношение потерь массы ΔM_{NaCl} в 3 % растворе $NaCl$ к потерям массы $\Delta M_{пр}$ в пресной воде уменьшается (рис. 2).

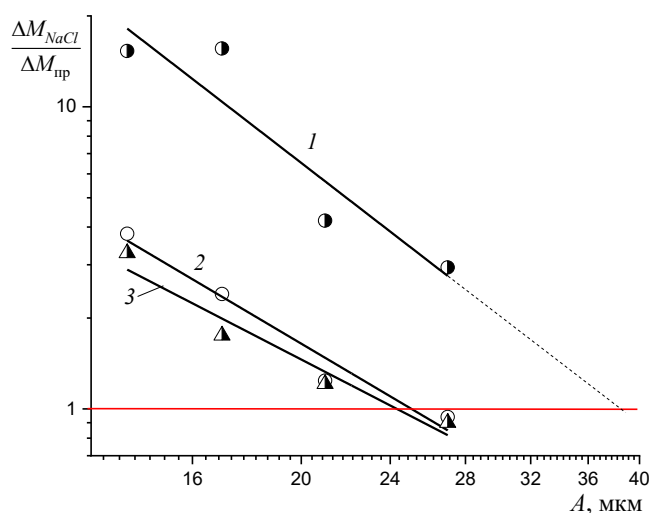


Рис. 2. Зависимость отношения потерь массы в 3 % растворе $NaCl$ к потерям массы в пресной воде от амплитуды колебаний торца концентраторов после 6 ч испытаний на ультразвуковом МСВ:
1 – бронза БрА8Мц11ЖЗН2Л; 2 – латунь ЛЦ40Мц3Ж;
3 – сталь 08Х14НДЛ

Как следует из рис. 2, для стали 08Х14НДЛ и для латуни при амплитуде, превышающей 27 мкм, наметилась тенденция перехода этого соотношения через значение, равное единице, т. е. при определённых условиях можно получить износ в коррозионно-активной жидкости существенно ниже, чем в пресной воде. Для алюминиевой бронзы, судя по рис. 2, можно предположить, что отношение $\Delta M_{NaCl} / \Delta M_{пр}$ достигнет единицы при $A \approx 40$ мкм.

Важно отметить, что до настоящего времени ни в одной из работ, известных авторам, не было зарегистрировано заметно меньшего кавитационного износа в агрессивной жидкости по сравнению с испытаниями в пресной воде. Тем не менее, как видно из рис. 2, гипотетически представляется возможным получить соотношение $\Delta M_{NaCl} / \Delta M_{пр}$ заметно ниже единицы: это можно сделать или увеличением амплитуды колебаний, или уменьшением коррозионной активности жидкости.

Так как увеличение амплитуды колебаний более 27 мкм в настоящих опытах оказалось невозможным из-за ограниченной мощности установки, то было принято решение уменьшить коррозионную активность жидкости. И следующая серия опытов состояла в сравнительных испытаниях латуни ЛЦ40Мц3Ж в искусственной морской и пресной воде. Как известно, морская вода уступает по коррозионной активности в условиях кавитации 3 % раствору $NaCl$ [2, 17]. При этом следует отметить, что если в первой серии опытов использовали цельнометаллическую оправку из алюминиевой бронзы (см. рис. 1, поз. 2), то во второй серии для испытаний в морской воде верхнюю часть оправки, в которой крепился образец, изготовили из капролона и только нижнюю – для устойчивого положения оправки на дне ёмкости – из бронзы. Тем самым

дополнительно снизили влияние коррозионного фактора на поверхность латуни, так как исключили контактную коррозию между оправкой и латуню.

Существуют различные рекомендации по составу искусственной морской воды для лабораторных испытаний [18, 19]: для настоящих опытов морскую воду готовили в соответствии с работой [19] (таблица).

Таблица

Состав искусственной морской воды [19]

Соль	Концентрация (г/л)
Хлорид натрия $NaCl$	24,6
Хлорид калия KCl	0,67
Двухводный хлорид кальция $CaCl_2 \times 2H_2O$	1,36
Семиводный сульфат магния $MgSO_4 \times 7H_2O$	6,29
Шестиводный хлорид магния $MgCl_2 \times 6H_2O$	4,66
Бикарбонат натрия (сода) $NaHCO_3$	0,18

При сравнительных испытаниях латуни в морской и пресной воде регистрировали не только изменение потерь массы латуни с течением времени кавитационного воздействия, но и изменение микротвёрдости поверхности в течение инкубационного периода. И в морской, и в пресной воде испытывали по два образца латуни. Значения микротвёрдости определяли на микротвердомере ПМТ-3 при трёх нагрузках на индентор Виккерса: 0,196; 0,49 и 0,98 Н. При каждой нагрузке наносили шесть отпечатков – по три отпечатка на каждом из двух испытанных образцов – всего 18 отпечатков, и за результат брали среднее арифметическое значение. Измерения заканчивали, когда на поверхности образовывался рельеф, не позволяющий наносить чёткие по форме отпечатки индентора.

Как видно из графиков рис. 3, при переходе от пресной воды к искусственной морской износ латуни ЛЦ40Мц3Ж снизился на треть; на рис. 3 штриховкой показаны полосы разброса результатов, условно ограниченные результатами испытаний первого и второго образцов: видно, что полосы разброса даже не перекрываются. Таким образом, на примере латуни ЛЦ40Мц3Ж подтверждено, что действительно при определённых сочетаниях коррозионной активности жидкости и интенсивности кавитационного воздействия можно получить снижение кавитационного износа сплава при переходе от пресной воды к морской воде; это сочетание, видимо, является индивидуальным для каждого сплава. То есть, результаты испытаний стали 08Х14НДЛ и латуни ЛЦ40Мц3Ж, соответствующие $A = 27$ мкм, представленные на рис. 2, на котором видно, что при указанной амплитуде износ в 3% растворе $NaCl$ несколько снизился по сравнению с износом в пресной воде, не являются случайными и их нельзя объяснить погрешностью эксперимента.

Заметное снижение износа латуни при переходе от пресной к морской воде (рис. 3) указывает на пластифицирующее действие морской воды на поверхность металлов: имеет место хемомеханический эффект [20] и, по всей видимости, так ярко он проявляется только при испытаниях на ультразвуковых МСВ. Анализ изменения микротвёрдости H_μ в пределах инкубационного периода (рис. 4) показал, что кинетика упрочнения латуни одинакова как в морской, так и в пресной воде: сначала микротвёрдость возрастает, достигает максимального значения, а потом снижается и «выходит» на постоянное значение. Момент, когда микротвёрдость изнашиваемой поверхности принимает постоянное значение, соответствует окончанию инкубационного периода (линии 2 и 2'). Таким образом, инкубационный период можно разбить на две стадии: стадию упрочнения и стадию разупрочнения; такая кинетика подтверждается и результатами измерений остаточных напряжений в поверхностных слоях [21, 22] при кавитационном воздействии.

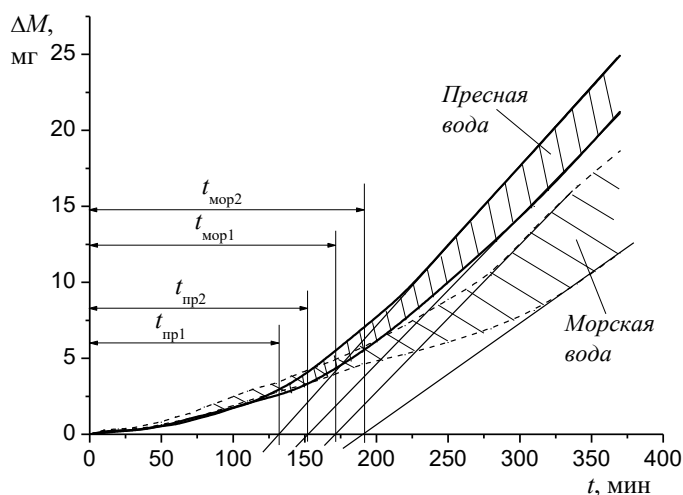


Рис. 3. Зависимость потерь массы образцов из латуни ЛЦ40Мц3Ж от продолжительности кавитационного воздействия при испытании в морской и пресной воде

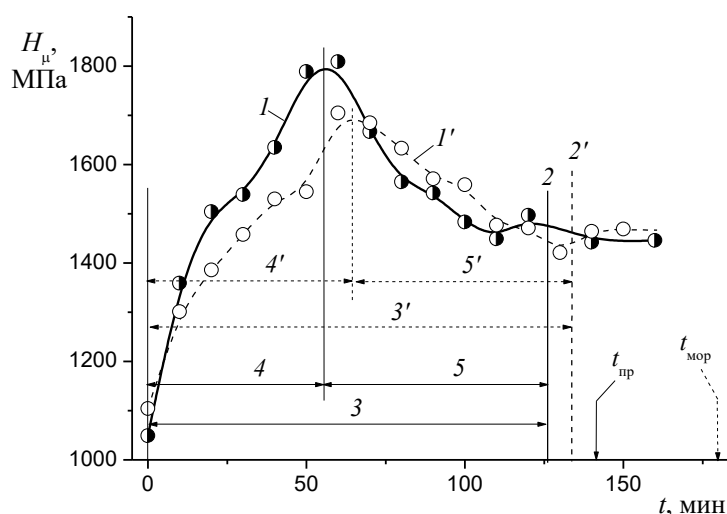


Рис. 4. Кинетика упрочнения латуни ЛЦ40Мц3Ж при кавитационном изнашивании в пресной (1) и искусственной морской (1') воде: 2 и 2' – окончание инкубационного периода в пресной и морской воде соответственно; 3 и 3' – продолжительность инкубационного периода, определённая методом микротвёрдости, в пресной и морской воде соответственно; 4 и 4' – продолжительность стадии упрочнения в пресной и морской воде соответственно; 5 и 5' – продолжительность стадии разупрочнения в пресной и морской воде соответственно

Из сравнения графиков $H_{\mu}(t)$ видно, что упрочнение поверхностных слоёв в морской воде заметно меньше, чем в пресной, при этом максимум микротвёрдости при изнашивании в морской воде достигается при кавитационном воздействии в морской воде позже, чем в пресной.

Интересно было сравнить продолжительность инкубационного периода, так как в течение него происходит накопление пластических деформаций в поверхностном слое до начала отделения частиц износа, и его продолжительность характеризует скорость увеличения плотности дислокаций в поверхностном слое при кавитационном воздействии. Так как из-за естественного разброса точек точное определение инкубационного периода по окончанию стадии разупрочнения в нашем случае оказалось невозможным (положение линий 2 и 2' указано примерно), то инкубационный период оценили традиционным способом, т. е. по пересечению касательных к кинетическим кривым изнашивания $\Delta M(t)$ с осью абсцисс [16]. Для случая испытаний в пресной воде инкубационный период $t_{пр}$ оценивали следующим образом:

$$t_{пр} = \frac{t_{пр1} + t_{пр2}}{2},$$

где $t_{пр1}$ и $t_{пр2}$ – продолжительности инкубационного периода, полученные при испытании в пресной воде первого и второго образца соответственно (рис. 3).

Аналогично оценивали и продолжительность инкубационного периода $t_{мор}$ и для случая испытаний в искусственной морской воде:

$$t_{мор} = \frac{t_{мор1} + t_{мор2}}{2},$$

где $t_{мор1}$ и $t_{мор2}$ – продолжительности инкубационного периода, полученные при испытании в искусственной морской воде первого и второго образца соответственно (рис. 3).

Найденные значения $t_{пр}$ и $t_{мор}$ для наглядности указали стрелками на рис. 4. Видно, что в морской воде инкубационный период получился более продолжительным примерно на 25 %.

Выраженный хемомеханический эффект при испытании в морской воде на ультразвуковом МСВ, проявляющийся в меньшем упрочнении латуни, большей продолжительности времени до достижения максимальной степени упрочнения и большей продолжительности инкубационного периода, чем в пресной воде, можно объяснить совместным действием на поверхность ударных волн с ультразвуковой частотой и коррозионного фактора. Поверхность является естественным барьером для выхода дислокаций, а совместное

действие ультразвука и морской воды снижает этот барьер. Известно, например, что при поверхностном пластическом деформировании при ударах незакреплёнными шариками с ультразвуковой частотой увеличивается подвижность дислокаций и степень насыщения дислокациями поверхностного слоя [23]. Снижение плотности дислокаций в поверхностном слое может происходить вследствие стравливания поверхностного слоя, насыщенного дислокациями при коррозии, или за счёт снижения напряжения в голове плоских скоплений дислокаций из-за образования двойного электрического слоя на поверхности и, как следствие, снижения его поверхностной энергии. Это ведёт не только к уменьшению скорости увеличения плотности дислокаций в поверхностном слое, но и к уменьшению насыщенности поверхностного слоя микрообъёмами с критической плотностью дислокаций, в которых начинается зарождение трещин, а, следовательно, и уменьшению кавитационного износа в морской воде по сравнению с пресной.

4. Выводы

При испытании на износостойкость в морской воде на ультразвуковом МСВ в условиях высокой интенсивности кавитационного воздействия происходит снижение износа по сравнению с опытами в пресной воде при той же интенсивности кавитации.

Указанный факт объясняется хемомеханическим эффектом, проявляющимся при совместном действии на поверхность металла электрохимической коррозии, ударных волн при коллективном схлопывании с ультразвуковой частотой кавитационных пузырьков и малой толщине пластически деформированного слоя металлической поверхности.

Обнаруженное явление следует принимать во внимание при проведении экспериментов по определению сравнительной кавитационной износостойкости сплавов в морской воде.

Список литературы:

1. Ponkratov, D. DES Prediction of Cavitation Erosion and Its Validation for a Ship Scale Propeller / D. Ponkratov // 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015). – Journal of Physics: Conference Series 656 (2015). – P. 1–4 [https://doi: 10.1088/1742-6596/656/1/012055](https://doi.org/10.1088/1742-6596/656/1/012055).
2. Фомин В.В. Гидроэрозия металлов. – М.: Машиностроение, 1977. – 287 с.
3. Цветков Ю.Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 155 с.
4. Möller H., Boshoff E. T., Froneman H. The corrosion behavior of a low carbon steel in natural and synthetic seawaters // The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. – 2006. – Vol. 106. – P. 585–592.
5. Elbeik S., Tseung A.C.C., Mackay A.L. The formation of calcareous deposits during the corrosion of mild steel in seawater // Corrosion Science. – 1986. – Vol. 26. – P. 669–680.
6. Osman M. M., Corrosion inhibition of aluminium-brass in 3,5 % NaCl solution and seawater // Materials Chemistry and Physics. – 2001. – Vol. 71. – P. 12–16.
7. Basumatary J., Nie M., Wood R. J. K. The synergistic Effects of Cavitation Erosion-Corrosion in Ship Propeller Materials // Journal of Bio- and Tribo-Corrosion. – 2015. – №12. – P. 1–12 <https://doi.org/10.1007/s40735-015-0012-1>.
8. Тимербулатов М.Г. Усовершенствование методики и определение кавитационной стойкости металлов применительно к гидротурбинам // Заводская лаборатория. – 1968. – №12. – С.1508–1511.
9. Waring S., Preiser H.S., Thiruvengadam A. On the role of corrosion in cavitation damage // Journal of Ship Research. – 1965. – V.9. – p. 200–208.
10. Пылаев Н. И., Эдель Ю.У. Кавитация в гидротурбинах – Л.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
11. Белый В.И., Некоз А.И. Исследование кавитационно-эрозионного изнашивания металлов в химически-активных средах // Проблемы трения и изнашивания – Киев: Техника, 1981. – вып.19. – С.76–79.
12. Волин В.Э., Гринберг А.Я. Влияние электрохимической коррозии на скорость кавитационной эрозии материалов // Тр. ВНИИ-Гидромаш, М.: Энергия, 1975. – вып.46. – С.44-53.
13. Некоз А.И., Стечишин М.С., Сологуб Н.А., Белый В.И. Определение износостойкости материалов при кавитационно-эрозионном изнашивании // Проблемы трения и изнашивания. – 1983. – вып.24. – С. 97–103.
14. Basumatary J., Wood R. J. K. The synergistic Effects of Cavitation Erosion and Corrosion for Nickel aluminium bronze with oxide film in 3,5 % NaCl solution // Wear. – 2017. – Vol. 376–377. – P. 1286–1297. [https://doi: 10.1016/j.wear.2017.01.047](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.047).
15. Sreedhar B.K., Albert S.K., Pandit A.B. Cavitation damage: Theory and measurements – A review // Wear. – 2017. – V. 372–373. – P. 177–196 <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.009>.
16. ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. – ASTM International, 2010. – 19 p.
17. Гликман Л.А. Коррозионно-механическая прочность металлов. – М.-Л.: Машгиз, 1955. –175 с.
18. ASTM D1141-98. Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. West Conshohocken, PA, ASTM International, 1999. – 3 p.
19. Cavanaugh G.M. Formulae and Methods VI. Woods Hole, MA, The Marine Biological, 1975. – 84 p.
20. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Металлургия, 1981. – 271 с.
21. Terauchi Y., Matuura H., Kitamura M. Correlation of cavitation damage tests with residual stress measurements // Bulletin of the JSME. – 1973. – V. 16. – No. 102. – P. 1829–1838.
22. Krause H., Matheus M. Investigation of cavitation erosion using X-ray residual stress analysis // Wear. – 1987. – Vol. 119. – No. 3. – P. 343–352.
23. Кулёмин А.В., Кононов А.В., Стебельков И.А. Повышение усталостной прочности деталей путём ультразвуковой поверхностной обработки // Проблемы прочности. – 1981. – №1. – С. 70–74.

INFLUENCE OF THE CORROSION FACTOR ON THE CAVITATION WEAR RESISTANCE OF ALLOYS FOR SHIP PROPELLERS

Yuriy N. Tsvetkov,

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

Evgeniy O. Gorbachenko,

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

Roman N. Larin,

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

Abstract. The cavitation wear resistance of 08H14NDL stainless steel, BrA8Mts11Zh3N2L bronze and LTs40Mts3Zh brass was studied in fresh water and artificial sea water of different compositions. The tests were carried out on a magnetostrictive vibrator with a hub oscillation frequency of about 22 kHz; the amplitude of vibrations of its end could be varied from 12 to 27 μm , the distance between the end of the concentrator and the surface of the samples was 0.5 mm. It was shown, that the increase in the amplitude of vibration leads to the decrease in the difference between the cavitation wear in fresh water and the sea water. It was demonstrated that under the cavitation attack of high intensity the brass wear in the sea water can be essentially lower than the one obtained in the fresh water.

The indicated paradox is explained, apparently, by the features of tests on ultrasonic magnetostrictive vibrators in combination with the plasticizing effect of an aggressive fluid. The ultrasonic frequency impact on the shock waves surface increases the mobility of dislocations, and the etching of surface layers in sea water facilitates their discharge on the surface: a chemomechanical effect takes place.

Keywords: cavitation wear, metallic alloy, ship propeller, ultrasonic magnetostriction vibrator, sea water, fresh water, microhardness, chemomechanical effect.

References:

1. Ponkratov D. «DES Prediction of Cavitation Erosion and Its Validation for a Ship Scale Propeller» 9th International Symposium on Cavitation (CAV2015). Journal of Physics: Conference Series 656 (2015): 1–4. [https://doi: 10.1088/1742-6596/656/1/012055](https://doi.org/10.1088/1742-6596/656/1/012055).
2. Fomin V.V. *Gidroeroziya metallov*. – M.: Mashinostroeniye, 1977. 287 p.
3. Tsvetkov Y.N. *Kavitatsionnoye iznashivaniye metallov i oborudovaniya*. – SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003. 155 p.
4. Möller H., Boshoff E.T., Froneman H. «The corrosion behavior of a low carbon steel in natural and synthetic seawaters» *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 106 (2006): 585–592.
5. Elbeik S., Tseung A.C.C., Mackay A.L. «The formation of calcareous deposits during the corrosion of mild steel in seawater» *Corrosion Science* 26 (1986): 669–680.
6. Osman M.M. «Corrosion inhibition of aluminium-brass in 3,5 % NaCl solution and seawater» *Materials Chemistry and Physics* 71(2001) 12–16.
7. Basumatary J., Nie M., Wood R. J.K. «The synergistic Effects of Cavitation Erosion-Corrosion in Ship Propeller Materials» *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion* 12 (2015): 1–12 <https://doi.org/10.1007/s40735-015-0012-1>
8. Timerbulatov M.G. «Uovershenstvovaniye metodiki i opredeleniye kavitatsionnoy stoykosti metallov primenitelno k gidroturbinam» (Improved technique to determine the cavitation erosion resistance of metal alloys as applied to hydroturbines) *Zavodskaya laboratoriya* 12 (1968): 1508–1511.
9. Waring S., Preiser H.S., Thiruvengadam A. «On the role of corrosion in cavitation damage» *Journal of Ship Research* 9 (1965): 200–208.
10. Pilayev N.I., Edel Yu.U. *Kavitatsiya v gidroturbinah*. – L.: Mashinostroyeniye, 1974. 256 p.
11. Belyi V.I., Nekoz A.I. «Issledovaniye kavitatsionno-erozionnogo iznashivaniya metallov v himicheski-aktivnykh sredakh» (Investigation of the cavitation wear of metals in chemically active environments) *Problemi treniya i iznashivaniya*. 19 (1981): 76–79.
12. Volin V.E., Grinberg A.Ya. «Vliyaniye elektrohimicheskoy korrozii na skorost kavitatsionnoy erozii materialov» (Influence of electrochemical corrosion on the cavitation wear rate of metals) *Trudi VNII-Gidromash* 46 (1975): 44–53.
13. Nekoz A.I., Stechishin M.S., Sologub N.A., Belyi V.I. «Opredeleniye iznosostoykosti materialov pri kavitatsionno-erozionnom iznashivani» (Evaluation of materials resistance against cavitation wear) *Problemi treniya i iznashivaniya* 24 (1983): 97–103.
14. Basumatary J., Wood R.J.K. «The synergistic Effects of Cavitation Erosion and Corrosion for Nickel aluminium bronze with oxide film in 3,5 % NaCl solution» *Wear* 376–377 (2017): 1286–1297 [https://doi: 10.1016/j.wear.2017.01.047](https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.047).
15. Sreedhar B.K., Albert S.K., Pandit A. B. «Cavitation damage: Theory and measurements – A review» *Wear* 372–373 (2017): 177–196 <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.009>.
16. ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. – ASTM International, 2010. 19 p.
17. Glikman L.A. *Korrozionno-mehaniicheskaya prochnost metallov*. – M.-L.: Mashgiz, 1955. 175 p.
18. ASTM D1141-98. Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. West Conshohocken, PA, ASTM International, 1999. 3 p.
19. Cavanaugh G.M. *Formulae and Methods VI*. Woods Hole, MA, The Marine Biological, 1975. 84 p.
20. Gutman E.M. *Mehanohimiya metallov i zashita ot korrozii*. – M.: Metallurgiya, 1981. 271 p.

21. Terauchi Y., Matuura H., Kitamura M. «Correlation of cavitation damage tests with residual stress measurements» Bulletin of the JSME 16.102 (1973): 1829–1838.
22. Krause H., Matheus M. «Investigation of cavitation erosion using X-ray residual stress analysis» Wear 119.3 (1987): 343–352.
23. Kulemin A.V., Kononov A.V., Stebelkov I.A. «Povisheniye ustalostnoi prochnosti detaley putem ultrazvukovoy poverhnostnoy obrabotki» (Increasing the fatigue resistance of parts by means of ultrasonic treatment of their surface) Problemi prochnosti 1 (1981): 70–74.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Юрий Николаевич Цветков, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технологии судоремонта, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»), 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7; e-mail: yuritsvet@mail.ru

Евгений Олегович Горбаченко, ассистент кафедры технологии судоремонта, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»), 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7; e-mail: jenuraqwerty@gmail.com

Ларин Роман Николаевич, к.т.н., доцент кафедры технологии судоремонта, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова (ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова»), 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7; e-mail: npo.albatros@gmail.com

Tsvetkov Yuriy Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences; Professor; Head of the Shiprepairing Subdepartment; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; 5/7 Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035, Russian Federation

Gorbachenko Evgeniy Olegovich – Postgraduate; Shiprepairing Subdepartment; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; 5/7 Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035, Russian Federation

Larin Roman Nikolaevich – Associate Professor; PhD in Engineering Science; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; 5/7 Dvinskaya st., St. Petersburg, 198035, Russian Federation

Статья поступила в редакцию 24.10.2019 г.