

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-696-704

KINETICS OF METAL MATERIALS HARDENING AT THE CAVITATION WEAR

Y. O. Gorbachenko, Y. N. Tsvetkov, Y. K. Loparev

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

The kinetics of metal alloys hardening within the incubation period of cavitation wear is explored in the paper. The tests are carried out on five materials — Al-Si-alloy AK12pch, brass L40Mtz3Zh, aluminum bronzes BrA9Zh4N4L and BrA7Mtz15Zh3N2Tz2L, and electrolytic chrome coating. All alloys listed above are used to manufacture either ship propellers (the copper alloys) or ship diesel parts (the aluminum-silicon alloy and chrome coating). An ultrasonic vibratory apparatus is used to conduct the experiments. The frequency and amplitude of the apparatus horn vibration are 22 kHz and 25 µm respectively. The fresh tap water is used in all experiments. The periodical weighing of the materials samples occurs during the tests. As a result the plots of mass losses versus time are obtained to estimate the incubation period duration. The microhardness of the samples surface exposed to cavitation attack is measured after the definite spans of time within the incubation period, and these measurements are carried out at different loads on the penetrator of the microhardness tester. It is shown, that during the incubation period the microhardness increases first and then decreases. Accordingly, the incubation period can be divided into two stages: the stage of hardening and stage of softening, the durations of these two stages are approximately equal. Hence, the microhardness reaches its maximum not at the end of the incubation period, but at the end of the hardening stage. The microhardness of the less ductile alloys such as a chrome coating after the incubation period completion as a rule decreases below the value corresponding to the initial state; whereas for the brass the microhardness after the incubation period completion is essentially higher than the microhardness before the cavitation attack. Thus, the microhardness measurements during the second half or at the end of the incubation period do not give the true information about the hardening degree of a metal.

Keywords: cavitation wear, ultrasonic vibratory apparatus, metal materials, incubation period of wear, plastic deformation, microhardness, metal hardening, metal softening.

For citation:

Gorbachenko, Yevgeniy O., Yuriy N. Tsvetkov, and Yuriy K. Loparev. "Kinetics of metal materials hardening at the cavitation wear." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 696–704. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-696-704.

УДК 620.193.16+531.3

КИНЕТИКА УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ИЗНАШИВАНИИ

Е. О. Горбаченко, Ю. Н. Цветков, Ю. К. Лопарев

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

Выполнено исследование кинетики упрочнения сплавов в пределах инкубационного периода кавитационного изнашивания. Проведены испытания металлических материалов: силумина AK12n4, латуни ЛЦ40Мц3Ж, бронз БрА9Ж4Н4Л и БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л и электролитического хромового покрытия, применяемых для изготовления блоков цилиндров судовых дизелей, судовой арматуры, гребных винтов и для нанесения на поверхность втулок цилиндров дизелей соответственно. Эксперименты проводились в пресной воде на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе при частоте колебаний концентратора, равной 22 кГц и амплитуде колебаний его торца около 25 мкм. В процессе испытаний проводили периодическое взвешивание образцов, по результатам которых строили кинетические кривые изнашивания, и по ним оценивали продолжительность инкубационного периода. В течение инкубационного периода также проводили измерения микротвердости изнашиваемой поверхности при разных нагрузках на индентор. По-



казано, что в течение инкубационного периода сначала происходит увеличение микротвердости поверхности, а потом ее уменьшение. Соответственно инкубационный период можно разделить на две стадии: стадию упрочнения и стадию разупрочнения, при этом продолжительность этих стадий примерно одинакова, и микротвердость достигает своего максимального значения не в конце инкубационного периода, а по окончании его первой стадии — стадии упрочнения. Продолжительности стадий упрочнения и разупрочнения примерно одинаковы. Для менее пластичных материалов, таких как хромовое покрытие, микротвердость после окончания стадии разупрочнения, как правило, снижается ниже значения, соответствующего исходному состоянию, тогда как для более пластичной латуни микротвердость после окончания стадии разупрочнения существенно выше микротвердости поверхности до кавитационного воздействия. Таким образом, измерения микротвердости во второй половине инкубационного периода или в момент его окончания не дадут истинной информации об упрочнении металла.

Ключевые слова: кавитационное изнашивание, ультразвуковой магнитострикционый вибратор, металлические материалы, инкубационный период изнашивания, пластическая деформация, микротвердость, упрочнение металла, разупрочнение металла.

Для цитирования:

Горбаченко Е. О. Кинетика упрочнения металлических материалов при кавитационном изнашивании / Е. О. Горбаченко, Ю. Н. Цветков, Ю. К. Лопарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 696–704. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-696-704.

Введение (Introduction)

На водном транспорте кавитационный износ — разрушение поверхности в потоке жидкости при воздействии струй и ударных волн, образующихся при схлопывании кавитационных каверн возникает на лопастях и направляющих насадках гребных винтов [1], [2], а также на омываемых водой поверхностях втулок и блоков цилиндров судовых высокооборотных дизелей [3]. Очаги кавитационного износа влияют не только на прочность изнашиваемых деталей, но и на КПД оборудования, поэтому предотвращению этого явления уделяется особое внимание. Одним из эффективных способов борьбы с кавитационным изнашиванием является выбор и применение износостойких сплавов и покрытий [3]–[8], что требует разработки надежных критериев кавитационной износостойкости. Многочисленные исследования этого вопроса [3], [8]-[11] показали, что наилучшим образом отражают кавитационную износостойкость энергетические критерии. Первый критерий подобного рода был предложен А. Тирувенгадамом [9]. Этот критерий определяется как площадь под диаграммой напряжение – деформация материала, доведенного до разрушения, т. е., по сути, критерий представляет собой удельную энергию разрушения (деформации) и имеет размерность Дж/м³. Дальнейшим этапом развития энергетических критериев износостойкости при кавитационном изнашивании и капельной эрозии можно считать критерий, предложенный Л. И. Погодаевым [3], представляющий собой критическую плотность потока мощности деформации; при разработке указанного критерия предполагалось, что в условиях циклически изменяющихся нагрузок единичный объем материала обладает ограниченной способностью аккумулировать энергию не только по величине, но и по времени, т. е. предложенный критерий имел размерность Bт/м².

Широкому применению энергетических критериев износостойкости мешает то обстоятельство, что они требуют знания схемы напряженного состояния поверхности, подвергающейся кавитационному воздействию, так как от напряженного состояния зависит пластичность металла, а, следовательно, и его энергоемкость. Очевидно, что значения удельной энергии деформации, получаемой по результатам стандартных испытаний на одноосное растяжение, не могут служить достоверной оценкой энергоемкости поверхностных слоев, деформируемых в условиях кавитационного воздействия. При холодной пластической деформации металла происходит его упрочнение (наклеп), что отражается в повышении его твердости. Известно, что зависимость твердости (или микротвердости) от интенсивности пластической деформации едина и не зависит от схемы напряженного состояния, при которой происходило деформирование металла [12]. Поэтому измерением твердости поверхности при кавитационном воздействии можно определить интенсивность деформаций, соответствующую началу разрушения поверхности, т. е. отделения с нее частиц износа.



Вместе с тем вопрос, в какой момент следует измерять твердость поверхности в процессе кавитационного воздействия, остается открытым. Известно, что кавитационное изнашивание металлических материалов характеризуется наличием инкубационного периода, в течение которого происходит накопление пластических деформаций в поверхностном слое. Очевидно, что измерение твердости должно производиться в пределах инкубационного периода. Однако подробных исследований кинетики упрочения металлов в это период не проводилось, а имеющиеся данные не дают полную картину изменения твердости в течение инкубационного периода. Так, в работах [7], [8] показано, что при испытании на струеударных стендах и магнитострикционных вибраторах в пределах инкубационного периода твердость поверхности возрастает, достигая насыщения. В то же время в работе [3] получено, что микротвердость технического алюминия при испытании на струеударном стенде проходит через максимум.

Целью работы является исследование кинетики упрочнения сплавов при кавитационном воздействии в пределах инкубационного периода.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Эксперименты на кавитационное изнашивание проводили на магнитострикционном вибраторе (МСВ) в мягкой пресной воде при температуре 20±3 °C. Частота колебаний концентратора составляла около 22 кГц, а амплитуду колебаний торца концентратора МСВ поддерживали равной 25 мкм [2]. Из большого объема материалов, применяемых для изготовления деталей судового оборудования, подвергающихся кавитационному воздействию, а именно: гребных винтов, втулок и блоков цилиндров судовых дизелей, судовой арматуры, были выбраны материалы, отличающиеся по твердости и склонности к упрочнению: хромовое электролитическое покрытие на сером чугуне, латунь ЛЦ40Мц3Ж, силумин АК12пч и алюминиевые бронзы БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л и БрА9Ж4Н4Л.

Хромовое покрытие наносили способом проточного анодноструйного хромирования на пластины толщиной 7 мм из серого чугуна. Толщина покрытия составила в среднем 90 мкм. Для испытаний из пластин вырезали квадратные образцы с размерами в плане 16 × 16. Латунь выплавляли в электропечи. Образцы также были квадратной формы и имели размеры 16 × 16 × 8. Образцы из бронзы вырезали из гребных винтов, бывших в эксплуатации, они представляли собой цилиндрики диаметром и высотой, соответственно, 16 и 10 мм. Аналогичной формы и размеров были образцы из силумина. Поверхность образцов, которую предполагалось подвергнуть кавитационному воздействию, перед испытаниями шлифовали шкурками разной зернистости, а затем полировали. Для крепления испытываемого образца в емкости с водой использовали специальную оправку. Расстояние между плоской поверхностью образца и торцом концентратора устанавливали равным 0,5 мм.

В процессе испытаний образцы периодически вынимали из оправки, промывали, высушивали и взвешивали на аналитических весах ВЛР-200 с дискретностью показаний 0,05 мг, а затем проводили измерения порефиля поверхности и измерения микротвердости. По результатам измерения потерь массы строили зависимости *износ – время*. Продолжительность инкубационного периода оценивали по точке пересечения с осью времени касательной, проведенной к участку наибольшей скорости изнашивания [13]. Так как диаметр микроструй жидкости в условиях испытаний на ультразвуковых МСВ составляет примерно 1–10 мкм, для исследования упрочнения поверхностных слоев применяли *метод микротвердости.* Измерения пороводили на микротвердомере ПМТ-3. Во избежание влияния на результат измерения явления нарушения подобия отпечатков, нанесенных на поверхность после разной продолжительности кавитационного воздействия, что может иметь место вследствие изменения характера распределения деформации по толщине поверхностных слоев, значения микротвердости определяли при трех нагрузках на индентор Виккерса: для хромового покрытия — при 0,490; 0,980 и 1,96 H; для силумина, латуни и бронз — при 0,196; 0,490 и 0,980 H.

Испытанию подвергались по два образца хромового покрытия, силумина и латуни и по одному образцу каждой бронзы. На хромовом покрытии, силумине и латуни 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; на образцах бронзы при каж-



2019 год. Tom 11. № 4

699

дой нагрузке наносили пять отпечатков (всего 15 отпечатков) и за окончательный результат также брали среднее арифметическое. Измерения микротвердости в течение инкубационного периода проводили до тех пор, пока рельеф поверхности, подвергаемой кавитационному воздействию, позволял наносить четкие по форме отпечатки индентора.

Результаты (Results)

На рис. 1 представлены зависимости потерь массы от времени кавитационного воздействия на МСВ и соответствующие изменения микротвердости поверхности в течение инкубационного периода кавитационного изнашивания хромового покрытия, латуни и силумина. Как видно, на всех испытанных металлах прослеживается одна и та же закономерность: сначала микротвердость возрастает, а затем снижается, и наблюдается тенденция к стабилизации ее значения, это видно по результатам испытания хрома (рис. 1, *a*) и частично — латуни (рис. 1, *б*). Тем не менее сделать однозначный вывод для всех сплавов о том, стабилизируется ли окончательно микротвердость после окончания инкубационного периода, или происходит ее дальнейшее периодическое изменение не представляется возможным, так как когда происходит отделение частиц износа и на поверхности появляется развитый рельеф, наносить четкие отпечатки на такую поверхность не представляется возможным. Например, на силумине (рис. 1, *в*) измерения пришлось прекратить до выхода зависимости $H_{\mu}(t)$ на горизонтальный участок, из-за того, что сильно развитый рельеф поверхности не позволил наносить четкие отпечатки.

Если отметить выход зависимости $H_{\mu}(t)$ на горизонтальный участок вертикальной линией 2 (см. рис. 1, *a* и б), то видно, что положение линии 2 примерно соответствует окончанию инкубационного периода, определенного, согласно рекомендациям [13], по точке пересечения касательной *l* с осью абсцисс. Таким образом, можно условно разбить инкубационный период на две стадии: *стадию упрочнения* t_{ynp} и *стадию разупрочнения* $t_{pазупр}$, продолжительность которых примерно одинаковая.



a)







Рис. 1. Кинетика изменения потерь массы (вверху) и упрочнения поверхности (внизу) при кавитационном изнашивании: *а* — хромового покрытия; *б* — латуни ЛЦ40Мц3Ж; *в* — силумина АК12пч

Аналогичный характер имеют также зависимости $H_{\mu}(t)$, полученные на бронзах. Измерения на косых шлифах, приготовленных из образцов силумина после различной продолжительности кавитационного воздействия в течение инкубационного периода, показали, что на стадии упрочнения идет постепенный рост толщины поверхностного слоя, пластически деформированного при кавитационном воздействии. При этом на стадии упрочнения микротвердость H_{μ} слоев плавно снижается с увеличением расстояния *h* от поверхности (рис. 2, *a*) и выходит на горизонтальный участок; по значению *h*, соответствующему выходу зависимости $H_{\mu}(h)$ на горизонтальный участок, можно определить глубину проникания пластической деформации. С приближением к максимуму на кривой $H_{\mu}(t)$ — см. 1, *в* — разброс точек на зависимости $H_{\mu}(h)$ увеличивается, что объясняется, по-видимому, постепенным насыщением поверхностных слоев энергией пластической деформации, при этом вследствие анизотропии и случайного положения в объеме металла не все кристаллиты имеют равную способность к аккумулированию пластической деформации. Однако при общем увеличения разброса точек среднее значение микротвердости при приближении к концу стадии упрочнения выравнивается по глубине, т. е. наклон начального участка зависимости $H_{\mu}(h)$ становится менее выраженным (рис. 2, *б*).



Рис. 2. Изменение микротвердости по глубине поверхностного слоя силумина, после кавитационного воздействия на МСВ течение 0,75 мин (*a*) и 3,5 мин (*б*)



Следует отметить, что характер изменения микротвердости металлов с увеличеним продолжительности кавитационного изнашивания не противоречит характеру изменения остаточных напряжений в поверхностном слое, измеренных рентгеновским методом, возникающих в результате кавитационного воздействия на ультразвуковом МСВ [14] и в условиях гидродинамической кавитации [15]. При кавитационном изнашивании пластической деформации подвержен тонкий поверхностный слой металла, и деформация распределена неравномерно по толщине слоя: пластическая деформация постепенно распространяется вглубь материала, толщина деформированного слоя увеличивается и проходит через максимум в момент, предшествующий началу трещинообразования в слое, в котором достигается предельная деформация. Таким образом, так как индентор микротвердомера проникает на некоторую глубину, значения микротвердости поверхности после кавитационного воздействия характеризуют интегральную микротвердость, определяемую микротвердостью всех слоев, расположенных по глубине вдавливания индентора. В этих условиях очень важно правильно выбрать нагрузку на индентор.

В таблице приведены результаты обработки зависимостей микротвердости поверхности испытанных сплавов от времени кавитационного воздействия, полученных при разных нагрузках P на индентор — пирамидку Виккерса — прибора для измерения микротвердости. В целом характер этих зависимостей аналогичен характеру зависимостей на рис. 1, полученных осреднением по всем нагрузкам на индентор, однако имеются особенности, на которые следует обратить внимание. Для получения представления о толщине слоев, участвующих в формировании значения микротвердости, в таблице представлены глубины h проникновения пирамидки при вдавливании с разной нагрузкой в исходную поверхность, а также значения H_{μ} исходной микротвердости, максимальные значения H_{max} микротвердости, достигаемые в пределах инкубационного периода, и значения $\Delta H_{\mu p max} - H_{\mu}$ и разупрочнения $\Delta H_{paзynp} = H_{max} - H_{\mu}$ поверхности.

Сплав	Р, Н	h, Микротвердость,			МПа	ΔH_{m}	ΔH_{max}
		МКМ	$H_{_{\rm H}}$	$H_{\rm max}$	$H_{\rm k}$	мпа	мПа
Хромовое покрытие	0,49	1,6	7450	8478	6166	1028	2312
	0,98	2,3	7340	8440	7112	1100	1328
	1,96	3,2	7484	8326	7464	842	862
БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л	0,196	2,6	1087	1330	956	243	374
	0,49	3,4	1640	1891	1520	251	371
	0,98	4,6	1818	2103	1601	285	502
БрА9Ж4Н4Л	0,196	3,0	694	901	716	207	185
	0,49	3,5	1255	1554	1232	299	322
	0,98	4,6	1504	1765	1534	261	231
ЛЦ40Мц3Ж	0,196	3,2	732	1330	924	598	406
	0,49	4,0	1186	2074	1596	888	478
	0,98	5,5	1231	2057	1814	826	243

определенные по зависимостям микротвердости от времени кавитационного воздействия, построенным для различных нагрузок на индентор

Характеристики упрочнения и разупрочнения материалов,

Из таблицы видно, что в целом (за исключением бронзы БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л) для сплавов прослеживается следующая тенденция: максимум упрочнения достигается не при самой малой глубине проникания индентора, т. е. не в тех слоях, которые примыкают к поверхности, а на некоторой глубине под поверхностью. Что касается бронзы БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л, то, по всей видимости, чтобы зарегистрировать для нее максимальное значение ΔH_{ynp} , необходимо было провести измерения при нагрузке P > 0,98 H, т. е. для нее максимум упрочнения получают слои, лежащие на глубине, превышающей 4,6 мкм. То обстоятельство, что максимум упрочнения реализуется на некоторой глубине под поверхностью, объясняется следующим. Известно, что при вдавливании сферического индентора максимальные пластические деформации возникают на некоторой



глубине под поверхностью [16] и в этих же районах, вероятно, появляются первые трещины. Если уподобить внедрение струи жидкости при схлопывании кавитационной каверны внедрению шара в поверхность, то можно предположить, что это справедливо и для случая кавитационного воздействия.

Пользуясь результатами исследований, изложенными в работе [2], можно утверждать, что в условиях настоящего эксперимента математическое ожидание размера частиц износа в зависимости от испытываемого сплава колеблется в пределах 1,5–4,0 мкм, т. е. у тонкого слоя, лежащего на этой глубине, раньше всего происходит исчерпание пластичности, и в этом слое возникают первые трещины. Следовательно, нагрузка на индентор должна быть оптимальной. Не имеет смысла выбирать нагрузку как можно меньшую, т. е. чтобы глубина проникания индентора была минимально возможной, так как, во-первых, слои, примыкающие к поверхности, не получают наибольшего упрочнения, и, во-вторых, чем меньше получаются отпечатки, тем больше погрешность в измерении их размеров. В то же время бессмысленно выбирать высокую нагрузку, обеспечивающую глубину проникания индентора, существенно превышающую размер продуктов износа, ведь тогда на результат измерений будет оказывать влияние твердость нижележащих менее наклепанных слоев. В любом случае оценка упрочнения методом микротвердости будет всегда иметь некоторую ошибку в меньшую сторону по сравнению с идеальной ситуацией, когда удалось бы измерить микротвердость тончайшего слоя, получившего наибольшее упрочнения и изолированного от менее деформированных выше- и нижележащих слоев.

Как видно из таблицы, для таких материалов, как хромовое покрытие и бронза БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л, $\Delta H_{ynp} < \Delta H_{paзynp}$, т. е. микротвердость после окончания стадии разупрочнения, как правило, снижается, становясь ниже значения, соответствующего исходному состоянию, тогда как для сравнительно пластичных материалов, таких как латунь ЛЦ40Мц3Ж, наоборот: $\Delta H_{ynp} > \Delta H_{paзynp}$. Это видно на примере зависимостей (см. рис. 1. *a*, *б*), полученных осреднением по всем нагрузкам. Алюминиевая бронза БрА9Ж4Н4Л занимает промежуточное положение: для нее $\Delta H_{ynp} \approx \Delta H_{paзynp}$. По всей видимости, соотношение между ΔH_{ynp} и $\Delta H_{paзynp}$ зависит от особенностей трещинообразования в поверхностных слоях разных сплавов, что, в свою очередь, определяется микроструктурой и пластичностью ее отдельных составляющих. При образовании разветвленной сетки микротрещин, что, можно предположить, наблюдается у такого сравнительно малопластичного материала, как хромовое электролитическое покрытие, происходит «разрыхление» материала и микротвердость может опуститься ниже исходного уровня.

Заключение (Conclusion)

Твердость металлических материалов в результате пластической деформации в пределах инкубационного периода кавитационного изнашивания сначала увеличивается, а затем уменьшается, соответственно инкубационный период можно разделить на две стадии: стадию упрочнения и стадию разупрочнения. Указанные стадии примерно равны по продолжительности. Таким образом, максимальное упрочнение поверхности имеет место не в конце, а примерно в середине инкубационного периода, когда заканчивается стадия упрочнения. Поэтому измерения микротвердости во второй половине инкубационного периода или в момент его окончания не дадут истинной информации об упрочнении металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.

2. Цветков Ю. Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.

3. Погодаев Л. И. Структурно-энергетические модели надёжности материалов и деталей машин / Л. И. Погодаев, В. Н. Кузьмин. — СПб.: Академия транспорта Российской Федерации, 2006. — 608 с.



4. *Kwok C. T.* Developments in laser-based surface engineering processes: with particular reference to protection against cavitation erosion / C. T. Kwok, H. C. Man, F. T. Cheng, K. H. Lo // Surface and Coatings Technology. — 2016. — Vol. 291. — Pp. 189–204. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.02.019.

5. *Qiao Y.* Cavitation erosion properties of a nickel-free high-nitrogen Fe-Cr-Mn-N stainless steel / Y. Qiao, X. Cai, Y. Chen, J. Cui, Y. Tang, H. Li, Z. Jiang // Materials and technology. — 2017. — Vol. 51. — No. 6. — Pp. 933–938.

6. *Momeni S*. Composite cavitation resistant PVD coatings based on NiTi thin films / S. Momeni, W. Tillmann, M. Pohl // Materials & Design. — 2016. — Vol. 110. — Pp. 830–838. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.08.054.

7. Фомин В. В. Гидроэрозия металлов / В. В. Фомин. — М.: Машиностроение, 1977. — 287 с.

8. *Muñoz-Cubillos J*. On the cavitation resistance of deep rolled surfaces of austenitic stainless steels / J. Muñoz-Cubillos, J. J. Coronado, S. A. Rodríguez // Wear. — 2019. — Vol. 428–429. — Pp. 24–31. DOI: 10.1016/ j.wear.2019.03.001.

9. *Eisenberg P*. On the mechanism of cavitation damage and methods of protection / P. Eisenberg, H. S. Preiser, A. Thiruvengadam // SNAME Transactions. — 1965. — Vol. 73. — Pp. 241–286.

10. Sreedhar B. K. Cavitation damage: Theory and measurements – A review / B. K. Sreedhar, S. K. Albert, A. B. Pandit // Wear. — 2017. — Vol. 372–373. — Pp. 177–196. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.009.

11. *Richman R. H.* Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals / R. H. Richman, W. P. McNaughton // Wear. — 1990. — Vol. 140. — Is. 1. — Pp. 63–82. DOI: 10.1016/0043-1648(90)90122-Q

12. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твёрдости / Г. Д. Дель. — М.: Машиностроение, 1971. — 199 с.

13. ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device. — ASTM International, 2010. — 19 p.

14. *Terauchi Y*. Correlation of cavitation damage tests with residual stress measurements / Y. Terauchi, H. Matuura, M. Kitamura // Bulletin of the JSME. — 1973. — Vol. 16. — No. 102. — Pp. 1829–1838. DOI: 10.1299/ jsme1958.16.1829.

15. *Krause H.* Investigation of cavitation erosion using X-ray residual stress analysis / H. Krause, M. Matheus // Wear. — 1987. — Vol. 119. — Is. 3. — Pp. 343–352. DOI: 10.1016/0043-1648(87)90040-8.

16. *Мышкин Н. К.* Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — М.: Физматлит, 2007. — 368 с.

REFERENCES

1. 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.

2. Tsvetkov, Yu. N. Kavitatsionnoe iznashivanie metallov i oborudovaniya. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003.

3. Pogodaev, L. I., and V. N. Kuz'min. *Strukturno-energeticheskie modeli nadezhnosti materialov i detalei mashin*. SPb.: Akademiya transporta Rossiiskoi Federatsii, 2006.

4. Kwok, C. T., H. C. Man, F. T. Cheng, and K.H. Lo. "Developments in laser-based surface engineering processes: with particular reference to protection against cavitation erosion." *Surface and Coatings Technology* 291 (2016): 189–204. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.02.019.

5. Qiao, Yanxin, Xiang Cai, Yipeng Chen, Jie Cui, Yanbing Tang, Huabing Li, and Zhouhua Jiang. "Cavitation erosion properties of a nickel-free high-nitrogen Fe-Cr-Mn-N stainless steel." *Materials and technology* 51.6 (2017): 933–938.

6. Momeni, Soroush, Wolfgang Tillmann, and Michael Pohl. "Composite cavitation resistant PVD coatings based on NiTi thin films." *Materials & Design* 110 (2016): 830–838. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.08.054

7. Fomin, V. V. Gidroeroziya metallov. M.: Mashinostroenie, 1977.

8. Muñoz-Cubillos, J., J. J. Coronado, and S.A. Rodríguez. "On the cavitation resistance of deep rolled surfaces of austenitic stainless steels." *Wear* 428–429 (2019): 24–31. DOI: 10.1016/j.wear.2019.03.001.

9. Eisenberg, P., H. S. Preiser, and A. Thiruvengadam. "On the mechanism of cavitation damage and methods of protection." *SNAME Transactions* 73 (1965): 241–286.

10. 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.



11. Richman, R. H., and W. P. McNaughton. "Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals." *Wear*140.1 (1990): 63–82. DOI: 10.1016/0043-1648(90)90122-Q.

12. Del', G. D. Opredelenie napryazhenii v plasticheskoi oblasti po raspredeleniyu tverdosti. M.: Mashino-stroenie, 1971.

13. *ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device*. ASTM International, 2010.

14. 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.

15. Krause, H., and M. Mathias. "Investigation of cavitation erosion using X-ray residual stress analysis." *Wear* 119.3 (1987): 343–352. DOI: 10.1016/0043-1648(87)90040-8.

16. Myshkin, N. K., and M. I. Petrokovets. *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii.* M.: Fizmatlit, 2007.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Горбаченко Евгений Олегович — аспирант	Gorbachenko, Yevgeniy O. — Postgraduate
Научный руководитель:	Supervisor:
Цветков Юрий Николаевич	Tsvetkov, Yuriy N.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала	Admiral Makarov State University of Maritime
С. О. Макарова»	and Inland Shipping
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
ул. Двинская, 5/7	Russian Federation
e-mail: jenyraqwerty@gmail.com, kaf_tsr@gumrf.ru	e-mail: jenyraqwerty@gmail.com, kaf_tsr@gumrf.ru
Цветков Юрий Николаевич —	Tsvetkov, Yuriy N. —
доктор технических наук, профессор	Doctor of Technical Sciences, professor
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала	Admiral Makarov State University of Maritime
С. О. Макарова»	and Inland Shipping
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
ул. Двинская, 5/7	Russian Federation
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru	e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Лопарев Юрий Константинович —	Loparev, Yuriy K. —
кандидат технических наук, доцент	PhD, associate professor
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала	Admiral Makarov State University of Maritime
С. О. Макарова»	and Inland Shipping
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
ул. Двинская, 5/7	Russian Federation
e-mail: kaf_tmm@gumrf.ru	e-mail: kaf_tmm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 3 июня 2019 г. Received: June 3, 2019.