

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Безюков Олег Константинович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Махфуд Маад — аспирант.
Научный руководитель:
Безюков Олег Константинович.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_sdvs@gumrf.ru, maad_mahfood@yahoo.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhukov Vladimir Anatoljevich —
Dr. of Technical Sciences, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Bezjukov Oleg Konstantinovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru
Makhfud Maad — postgraduate.
Supervisor:
Bezjukov Oleg Konstantinovich.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
kaf_sdvs@gumrf.ru, maad_mahfood@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 20 июня 2016 г.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-131-137
УДК 621.43: 629.12.004.62

**Ю. Н. Цветков,
Е. О. Горбаченко**

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ
ПРИ ИСПЫТАНИИ МАТЕРИАЛОВ ВТУЛОК ЦИЛИНДРОВ
СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ НА КАВИТАЦИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ**

Проведены испытания серого чугуна СЧ24 и стали 38ХМ на кавитационное изнашивание. Эксперименты осуществляли в пресной воде на магнитострикционном вибраторе при частоте и амплитуде колебаний торца концентратора равных, соответственно, 22 кГц и 28 мкм. В процессе испытаний производили периодическое взвешивание образцов и измерение шероховатости их поверхности. Построены зависимости потерь массы и среднего арифметического отклонения профиля поверхности образцов от времени. Зависимость высоты неровностей от продолжительности кавитационного воздействия имеет вид ломаной линии, которая делится точками перелома на три участка. Сопоставительный анализ зависимости износа от времени и зависимости среднего арифметического отклонения профиля от времени для каждого из испытанных материалов позволил установить, что указанные переломы свидетельствуют о смене ведущих процессов, ответственных за образование неровностей на поверхности. Показано, что по точке перелома, отделяющей первый участок от второго, можно судить о продолжительности инкубационного периода изнашивания.

Ключевые слова: судовой дизель, втулка цилиндра, кавитационный износ, шероховатость поверхности, инкубационный период изнашивания

Введение

Кавитационный износ является распространённым видом повреждений охлаждаемых водой поверхностей втулок и блоков цилиндров судовых дизелей [1] – [6]. Причиной износа является вибрация стенок втулок, возникающая при ударах поршня по втулке в момент его перекадки, приводящая к возникновению вибрационной кавитации в охлаждающей жидкости. Так, например, кавитационные разрушения часто происходили в двигателях 3Д6 [1], [2] (рис. 1), в результате чего

втулки их цилиндров выходили из строя уже после 1500 – 2300 ч эксплуатации при моторесурсе 12 000 ч [3]. В дизелях 6Д50М, установленных на больших морских рыболовецких траулерах, кавитационный износ возникал на средних частях боковых поверхностей втулок: зоны износа имели размеры 110 × 60 мм и глубину до 13 мм [4]. В этих же дизелях неоднократно был зарегистрирован кавитационный износ блоков цилиндров. По причине кавитационного износа втулки цилиндров двигателей 6НФД48У нередко приходилось заменять уже после приблизительно 18 000 ч эксплуатации, тогда как ресурс втулок, рассчитанный по скорости изнашивания их поверхности трения — «зеркала», был равен примерно 30 000 ч [3].

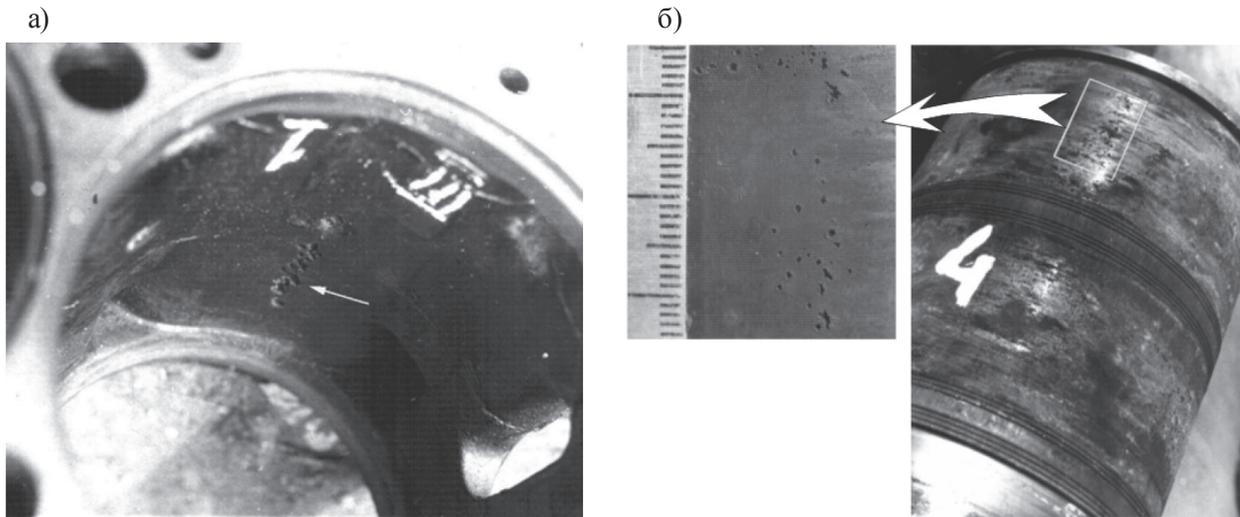


Рис. 1. Кавитационный износ блока цилиндров (а) и втулки цилиндра (б) дизеля 3Д6 теплохода РБТ-8 (данные В. В. Капустина)

Теоретическому и экспериментальному исследованию кавитационного изнашивания водоохлаждаемых поверхностей втулок цилиндров двигателей внутреннего сгорания в настоящее время уделяют серьёзное внимание [7], [8]. Увеличение частоты вращения коленчатого вала и уменьшение массы и габаритов современных двигателей ведёт к уменьшению толщины втулки, что заметно увеличивает скорость её колебательного движения и, как следствие, повышает вероятность возникновения кавитационного разрушения. Это позволяет утверждать, что проблема кавитационного изнашивания водоохлаждаемой поверхности втулок судовых дизелей в ближайшей перспективе останется актуальной.

Существуют различные направления борьбы с кавитационным изнашиванием втулок цилиндров дизелей [1], [2], [9], а именно: добавление в охлаждающую жидкость различных присадок, химико-термическая обработка втулок, нанесение на их водоохлаждаемую поверхность различных покрытий. Реализация указанных направлений подразумевает трудоёмкие лабораторные испытания материалов втулок на кавитационную износостойкость. Известно, что отделение материала с поверхности, подверженной кавитационному воздействию, происходит после определённого периода времени, называемого *инкубационным*, или *аккумуляционным периодом*. В течение инкубационного периода происходит наклёп поверхностного слоя, и после того, как запас пластичности металла поверхностного слоя иссякнет, начинается образование микротрещин, а, после их слияния, отделение частиц износа [10], [11]: скорость потерь массы быстро возрастает и достигает максимального значения. При сравнительных испытаниях важно надёжно определять продолжительность инкубационного периода, так как процессы накопления повреждений в течение инкубационного периода определяют кинетику последующего процесса отделения продуктов изнашивания, и от продолжительности инкубационного периода зависит скорость изнашивания. В этой связи важным является разработка методики ускоренной оценки продолжительности инкубационного периода при лабораторных испытаниях на кавитационную износостойкость.

В работе [12] показана перспективность применения метода измерения шероховатости поверхности, подверженной кавитационному воздействию, для оценки инкубационного периода. Современная техника для измерения профиля поверхности позволяет проводить измерения шероховатости очень быстро, и введение этой процедуры в эксперимент не увеличивает его продолжительность.

Цель работы — анализ возможности применения метода измерения шероховатости поверхности для определения продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания материалов, применяемых для изготовления втулок цилиндров судовых дизелей.

Методика эксперимента. Эксперименты на кавитационное изнашивание проводили на магнитоэлектрическом вибраторе [10] в мягкой пресной воде при температуре 20 ± 3 °С. Частота колебаний концентратора составляла около 22 кГц, а амплитуда колебаний торца концентратора на магнитоэлектрическом вибраторе — 28 мкм. Как известно, самыми распространёнными материалами для изготовления втулок цилиндров судовых дизелей являются серый перлитный чугун и среднеуглеродистые низколегированные стали, содержащие хром, молибден, алюминий, в частности сталь 38Х2МЮА. Поэтому для испытаний выбрали серый чугун СЧ24 и сталь 38ХМ как близкую по составу и свойствам стали 38Х2МЮА. Образцы из стали имели цилиндрическую форму диаметром и высотой примерно 15 и 10 мм соответственно, а образцы из чугуна имели форму прямоугольных параллелепипедов размером $16 \times 16 \times 8$ мм. Поверхность образцов, которую предполагалось подвергнуть кавитационному воздействию, перед испытаниями шлифовали, а затем полировали. Для крепления испытываемого образца в ёмкости с водой использовали специальную оправку. Последнюю устанавливали так, чтобы расстояние между плоской поверхностью образца и торцом концентратора было равно 0,5 мм.

В процессе испытаний образцы периодически вынимали из оправки, промывали, высушивали и взвешивали на аналитических весах с точностью 0,1 мг, а затем проводили измерения шероховатости. Оценку шероховатости производили с помощью профилометра *MarSurf PSI*, на котором регистрировали среднее арифметическое отклонение профиля R_a (ИСО 4287-1997). Во всех измерениях шероховатости базовая длина была одинаковой и равнялась 0,8 мм. Базовую длину выбирали из условия, чтобы траектория движения щупа прибора (длина оценки равнялась пяти базовым длинам) не выходила за площадь очага износа, но при этом пересекала как можно больший его участок.

Анализ результатов эксперимента. На рис. 2 и 3 представлены результаты экспериментов, соответственно, на стали 38ХМ и сером чугуне СЧ24 в пресной воде. Для наглядности зависимости потерь массы ΔM и среднего арифметического отклонения профиля R_a от продолжительности t испытаний на кавитационное изнашивание размещены одна над другой.

Сравнительный анализ графиков $\Delta M(t)$ и $R_a(t)$ позволяет сделать вывод об их внешнем сходстве (рис. 2) на основе данных источника [12], однако, если изменение потерь массы во времени хорошо описывается плавной кривой, то изменение высоты неровностей поверхности с течением времени удобно аппроксимировать ломаной линией.

Присутствующие естественным образом как точки стыка прямолинейных участков на указанной ломаной линии точки перелома условно делят её на три характерные участка (на графике обозначены римскими цифрами *I*, *II* и *III*). Каждый участок соответствует отрезку времени, в течение которого доминирует определённый фактор, ответственный за увеличение неровностей поверхности. Наступление перелома на зависимости $R_a(t)$ указывает на смену этих факторов. Сравнивая зависимости $\Delta M(t)$ и $R_a(t)$, можно предположить, что на участке *I* увеличение параметра R_a происходит за счёт образования вмятин при ударах капель и микроструй о поверхность: на этом участке имеет место пластическая деформация поверхности без существенных потерь массы. На участке *II* основным в увеличении параметра R_a является начавшийся процесс отделения частиц износа с поверхности, на которой наряду с участками деформированной поверхности, с которых ещё не отделялись частицы, существуют участки, с которых материал уже отделился. На участке *III* наступила стабилизация: верхний слой исходной поверхности, получивший предельную степень наклёпа в течение инкубационного периода, полностью удалён с поверхности, и частицы износа начали отделяться уже с изношенной поверхности, при этом скорость увеличения высоты неровностей резко замедлилась.

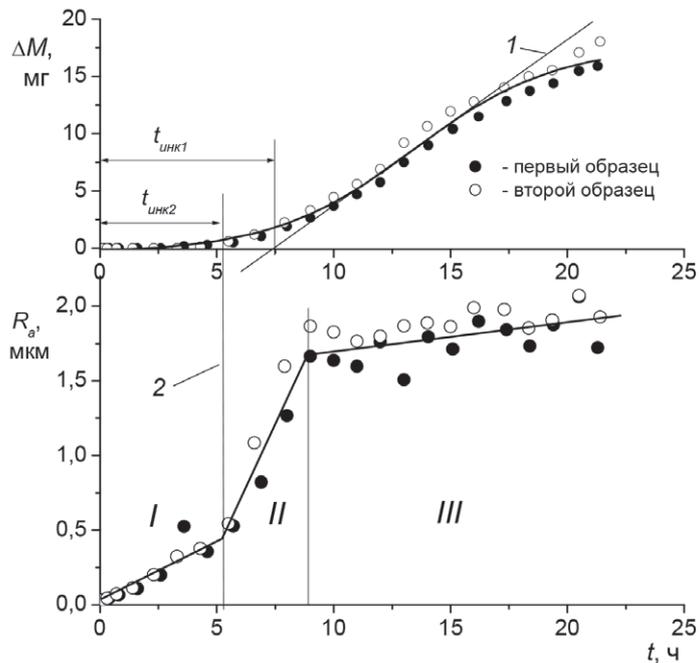


Рис. 2. Зависимости потери массы образцов из стали 38ХМ и среднего арифметического отклонения профиля их поверхности от продолжительности кавитационного воздействия в пресной воде

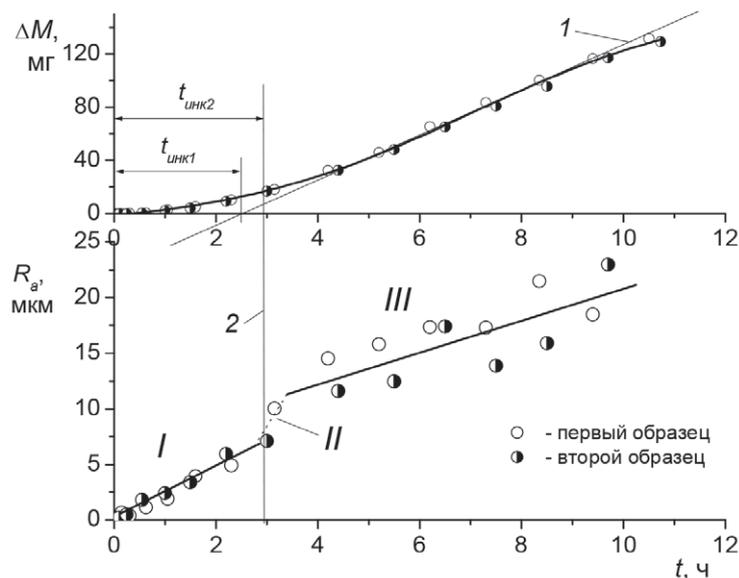


Рис. 3. Зависимости потерь массы образцов из серого чугуна СЧ24 и среднего арифметического отклонения профиля их поверхности от продолжительности кавитационного воздействия в пресной воде

Если ранее изложенное верно, то первая точка перелома (граница между участками I и II) должна соответствовать окончанию инкубационного периода. Действительно, на рис. 2 показаны продолжительности инкубационного периода $t_{инк1}$ и $t_{инк2}$, определенные двумя способами: 1) традиционным, по точке пересечения с осью абсцисс прямой 1, проведённой касательно к кривой $\Delta M(t)$ через точку её перегиба; 2) способом, предлагаемым в данной статье, по точке пересечения с осью абсцисс перпендикуляра 2, проведённого из первой точки перелома на ломаной $R_a(t)$. Разница между значениями $t_{инк1}$ и $t_{инк2}$ в рассматриваемом случае составила менее 30 %.

Необходимо отметить, что закономерности кинетики изменения шероховатости, обнаруженные на стали 38ХМ, подтвердились также ранее при испытаниях сталей 25Л, 08Х14НДЛ и 08Х15Н4ДМЛ, используемых для изготовления гребных винтов. При этом для них разница между продолжительностями $t_{инк1}$ и $t_{инк2}$ оказалась существенно меньшей или отсутствующей вообще. Преимущество в использовании величины $t_{инк2}$ состоит в том, что она привязана к моменту смены одного ведущего фактора (пластического деформирования поверхности) в образовании неровностей на другой (отделение частиц износа). Тогда как величина $t_{инк1}$, по сути, является условной.

Ранее изложенное подтвердилось также и результатами испытания серого чугуна (рис. 3), которые в целом согласуются с результатами опытов на стали 38ХМ. Однако характер изменения шероховатости поверхности серого чугуна СЧ24 при кавитационном воздействии несколько отличается от аналогичного для стали. Как видно из рис. 3, отрезок II при испытании чугуна получается очень коротким, и фактически на зависимости $R_a(t)$ образуется не перелом, а разрыв. Это обусловлено, по всей видимости, тем, что кавитационное разрушение чугуна, в отличие от стали, имеет хрупкий характер. Хрупкому разрушению способствует наличие пластинчатых графитовых включений, у острых углов которых создаётся концентрация напряжений [2]; из-за пренебрежимо низкой кавитационной износостойкости графита графитовые включения, по сути, играют роль пустот, существенно сокращая путь распространения трещин до их слияния и, соответственно, время до начала отделения частиц износа. Чтобы показать, что это действительно так, были проведены дополнительные эксперименты чугуна в искусственной морской воде 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 %. Выбор морской воды обусловлен тем, что ранее был обнаружен хемомеханический эффект при совместном действии в искусственной морской воде механического (кавитационных микроударов) и химического (электрохимической коррозии) факторов. Хемомеханический эффект проявляется в пластифицирующем воздействии коррозионной среды [13] и в данном случае должен уменьшить негативное влияние графитовых включений на пластичность чугуна.

Как видно из сравнения графиков на рис. 3 и 4, в результате хемомеханического эффекта продолжительность инкубационного периода при изнашивании чугуна в морской воде возросла, соответственно более длинным получился участок I зависимости $R_a(t)$ и в результате более продолжительным и выраженным получился период II. Участок III зарегистрировать не удалось из-за сильно возросшей высоты неровностей и превышения предельного значения, установленного для профилометра *MarSurf PSI*.

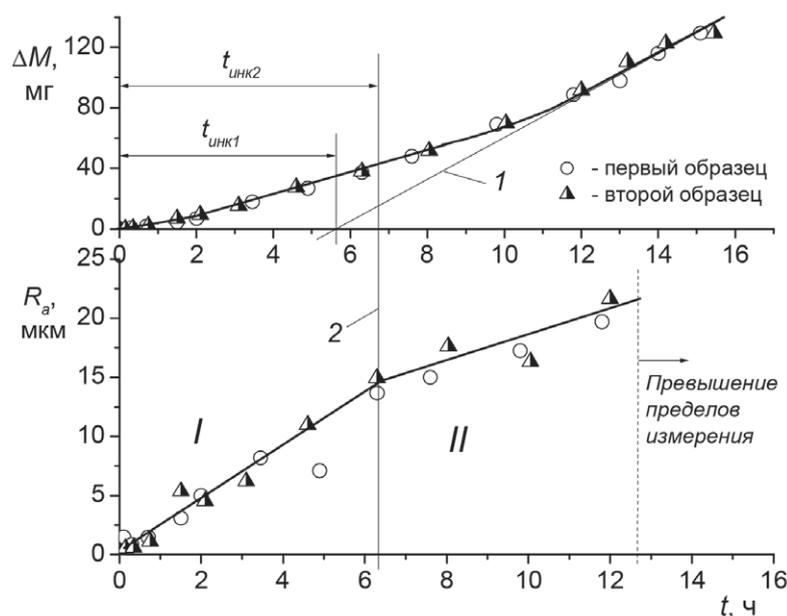


Рис. 4. Зависимости потерь массы образцов из серого чугуна СЧ24 и среднего арифметического отклонения профиля их поверхности от продолжительности кавитационного воздействия в искусственной морской воде

Следует отметить, что в отличие от рис. 2 и 3, а также результатов, полученных ранее на разных сталях, при испытании чугуна в искусственной морской воде наклон участка *II* по сравнению с участком *I* уменьшился. Вместе с тем, окончание инкубационного периода по-прежнему сопровождается переломом на графике $R_a(t)$, что подтверждает надёжность метода измерения шероховатости для определения продолжительности инкубационного периода.

Выводы

1. Зависимости высотного параметра шероховатости поверхности стали 38ХМ и серого чугуна СЧ24 от продолжительности кавитационного воздействия можно аппроксимировать ломаной линией, которая делится точками перелома на три участка. Переломы указывают на смену ведущих процессов, ответственных за образование неровностей на поверхности.

2. Продолжительность инкубационного периода можно оценивать по точке перелома, отделяющей участок *I* от участка *II*. Выявленная особенность, заключающаяся в линейном характере изменения высотного параметра шероховатости с течением времени в пределах инкубационного периода, может быть в дальнейшем использована для прогнозирования продолжительности инкубационного периода.

3. Для разработки методики прогнозирования необходимо провести комплекс экспериментов, чтобы выяснить как влияют условия изнашивания (в частности, интенсивность кавитационного воздействия и агрессивность водной среды) на положение точки перелома, отделяющей участок *I* зависимости $R_a(t)$ от участка *II*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванченко Н. Н.* Кавитационные разрушения в дизелях / Н. Н. Иванченко, А. А. Скуридин, М. Д. Никитин. — Л.: Машиностроение, 1970. — 152 с.
2. *Фомин В. В.* Гидроэрозия металлов / В. В. Фомин. — М.: Машиностроение, 1977. — 287 с.
3. *Погодаев Л. И.* Эрозия в системах охлаждения дизелей / Л. И. Погодаев, А. П. Пимошенко, В. В. Капустин. — Калининград, 1993. — 325 с.
4. *Пимошенко А. П.* Защита судовых дизелей от кавитационных разрушений / А. П. Пимошенко. — Л.: Судостроение, 1983. — 120 с.
5. *Zhou Yu-K.* Cavitation erosion of diesel engine wet cylinder liners / Yu-K. Zhou, J.-G. He, F. G. Hammit // *Wear.* — 1982. — Vol. 76. — Is. 3. — Pp. 321–328. DOI: 10.1016/0043-1648(82)90070-9.
6. *Zhou Yu-K.* Cavitation erosion of cast iron diesel engine liners / Yu-K. Zhou, J.-G. He, F. G. Hammit // *Wear.* — 1982. — Vol. 76. — Is. 3. — Pp. 329–335. DOI: 10.1016/0043-1648(82)90071-0.
7. *Kim D.* Effects of cylinder head temperature and coolant velocity on the erosion behavior of water jacket in a diesel engine / D. Kim, J. Hwang, S. Han, C. Bae // *Wear.* — 2015. — Vol. 342–343. — Pp. 117–128. DOI:10.1016/j.wear.2015.06.021.
8. *Fontanesi S.* Numerical investigation of the cavitation damage in the wet cylinder liner of a high performance motorbike engine / S. Fontanesi, M. Giacomini, G. Cicalese, S. Sissa, S. Fantoni // *Engineering Failure Analysis.* — 2014. — Vol. 44. — Pp. 408–423. DOI:10.1016/j.engfailanal. 2014.05.025.
9. *Пахомова Н. В.* Износ втулки цилиндра и её кавитационная стойкость / Н. В. Пахомова, А. В. Воробьёв // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология.* — 2014. — № 4. — С. 86–93.
10. *Цветков Ю. Н.* Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
11. *Погодаев Л. И.* Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования / Л. И. Погодаев, П. А. Шевченко. — Л.: Судостроение, 1984. — 264 с.
12. *Цветков Ю. Н.* Исследование кавитационного изнашивания сталей методом измерения профиля поверхности / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* — 2015. — Т. 81. — № 11. — С. 62–65.
13. *Гутман Э. М.* Механохимия металлов и защита от коррозии / Э. М. Гутман. — М.: Металлургия, 1981. — 271 с.

USING THE MEASUREMENTS OF ROUGHNESS IN TESTING MATERIALS OF SHIP DIESEL CYLINDER LINERS FOR CAVITATION WEAR

The grey cast iron SCh24 and steel 38HM were tested for cavitation wear in fresh water in a 22 kHz vibratory cavitation apparatus. The mass of the samples and the roughness of their surface were measured periodically during testing. As a result, two kinds of dependences were plotted: mass losses vs. time and arithmetical mean deviation of the assessed profile vs. time. The graph of arithmetical mean deviation of the assessed profile against time turned out to be a broken line consisted of three sections. Juxtaposition of the above-mentioned dependences showed that the breakings correspond to the change of a leading process responsible for asperities formation on the surface. The breaking point between the first two sections can be used to estimate the incubation period of cavitation wear.

Keywords: ship diesel, cylinder liner, cavitation wear, surface roughness, incubation period of wear.

REFERENCES

1. Ivanchenko, Nikolay Nikolayevich, A. A. Skuridin, and M. D. Nikitin. *Kavitatsionnie razrusheniya v dizeliah*. L.: Mashinostroeniye, 1970.
2. Fomin, Viktor Vasilievich. *Gidroeroziya metallov*. M.: Mashinostroeniye, 1977.
3. Pogodayev, Leongard Ivanovich, A. P. Pimoshenko, and V. V. Kapustin. *Eroziya v sistemah ohlazhdeniya dizeley*. Kaliningrad, 1993.
4. Pimoshenko, Aleksandr Petrovich. *Zashita sudovyh dizeley ot kavitatsionnyh razrusheniy*. L.: Sudostroyeniye, 1983.
5. Zhou, Yu-Kang, Jiu-Gen He, and F. G. Hammit. "Cavitation erosion of diesel engine wet cylinder liners." *Wear* 76.3 (1982): 321–328.
6. Zhou, Yu-Kang, Jiu-Gen He, and F. G. Hammit. "Cavitation erosion of cast iron diesel engine liners." *Wear* 76.3 (1982): 329–335. DOI:10.1016/0043-1648(82)90071-0.
7. Kim, Donghoon, J. Hwang, S. Han, and C. Bae. "Effects of cylinder head temperature and coolant velocity on the erosion behavior of water jacket in a diesel engine." *Wear* 342–343 (2015): 117–128. DOI:10.1016/j.wear.2015.06.021.
8. Fontanesi, S., M. Giacomini, G. Cicalese, S. Sissa, and S. Fantoni. "Numerical investigation of the cavitation damage in the wet cylinder liner of a high performance motorbike engine." *Engineering Failure Analysis* 44 (2014): 408–423. DOI:10.1016/j.engfailanal.2014.05.025.
9. Pakhomova, N. V., and A. V. Vorobyov. "Wear of cylinder liner and its cavitation resistance." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 4 (2014): 86–93.
10. Tsvetkov, Yuriy Nikolayevich. *Kavitatsionnoye iznashivaniye metallov i oborudovaniya*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003.
11. Pogodayev, Leongard Ivanovich, and P. A. Shevchenko. *Gidroabrazivnyy i kavitatsionnyy iznos sudovogo oborudovaniya*. L.: Sudostroeniye, 1984.
12. Tsvetkov, Yuriy Nikolayevich, and Evgeniy Olegovich Gorbachenko. "Estimation of Incubation Period at Cavitation Wear of Steel through Measuring Roughness." *Industrial Laboratory* 81.11 (2015): 62–65.
13. Gutman, Emmanuil Markovich. *Mehanohimiya metallov I zashita ot korrozii*. M.: Metallurgiya, 1981.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
 доктор технических наук, профессор.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 yuritsvet@mail.ru, kaf_tsr@gumrf.ru
 Горбаченко Евгений Олегович — аспирант.
 Научный руководитель:
 Цветков Юрий Николаевич.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 jenyraqwerty@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov Yuriy Nikolayevich —
 Dr. of Technical Sciences, professor.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 yuritsvet@mail.ru
 Gorbachenko Yevgeniy Olegovich — postgraduate.
 Supervisor:
 Tsvetkov Yuriy Nikolayevich.
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 jenyraqwerty@gmail.com