

DESTRUCTION MECHANISMS OF EPOXY-BASED COMPOSITE FILLED WITH METAL POWDER UNDER CAVITATION ATTACK

Ya. O. Fiaktistov¹, Yu. N. Tsvetkov¹, N. S. Zaytseva²

¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

² — JSC “Admiralty Shipyards”, St. Petersburg, Russian Federation

The samples of epoxy compound with a powder filler and without it are tested on cavitation wear. The powder of aluminum bronze BrAZhNMts9–4–4–1 is used as a filler. The powder is obtained by filing the rod of the bronze. The composition of the epoxy compound is 100 parts of the resin K-153 plus 12 parts of the hardener (polyethylene epolyamine). The distribution of the bronze particles in the epoxy compound follows the law close to the exponential one, the average particle size is equal to approximately 27 μm , and the volume fraction of the bronze powder in the compound is about 9,5 percent. The tests are conducted using the ultrasonic magnetostrictive vibrator UZDN-2T in fresh water of room temperature, the frequency and amplitude of the vibrator horn end equal to 22 kHz and 28 μm respectively. The distance between the horn end and the sample surface is 0,5 mm. During the experiments the wear of the samples is evaluated by their weighting on analytical scales with step-type indication of 0,1 mg, measuring the surface roughness and the microhardness of the bronze particles in the composite is carried out as well. It has been shown that the addition of the bronze particles into the epoxy compound not only changes the kinetics of cavitation wear of the polymer but also decreases its cavitation resistance. The decrease in cavitation resistance caused by bronze particles addition is attributed to the fact, that the boundary between a metal particle and epoxy matrix is a «weak» spot, and the destruction of polymer begins from this boundary area under cavitation attack.

Keywords: epoxy compound, powder filler, bronze particles, ultrasonic vibratory device, fresh water, cavitation attack, cavitation wear kinetics, wear, wear mechanisms.

For citation:

Fiaktistov, Yaroslav O., Yuriy N. Tsvetkov, and Nataliya S. Zaytseva. “Destruction mechanisms of epoxy-based composite filled with metal powder under cavitation attack.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 64–72. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-64-72.

УДК 620.193.16

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ПОРОШКОВЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Я. О. Фиактистов¹, Ю. Н. Цветков¹, Н. С. Зайцева²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — АО «Адмиралтейские верфи», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассмотрены результаты испытаний на кавитационный износ образцов эпоксидного компаунда без наполнителя и с наполнителем. В качестве последнего применен порошок из алюминиевой бронзы BrAZhNMts9-4-4-1, полученный опилованием прутка из этой бронзы. Был использован следующий состав компаунда: 100 частей смолы K-153 и 12 частей отвердителя (полиэтиленполиамин). Распределение частиц бронзы в компаунде по размеру подчинялось закону, близкому к показательному, средний размер частиц составил порядка 27 мкм, объемная доля бронзового порошка в компаунде — примерно 9,5 %. Отмечается, что испытания проводили на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе УЗДН-2Т в пресной воде при комнатной температуре с частотой и амплитудой колебаний торца концентратора вибратора 22 кГц и 28 мкм соответственно. Расстояние между торцами концентратора и цилиндрического образца выставилось равным 0,5 мм. В процессе испытаний износ образцов оценивали взвешиванием на аналитических

весах с дискретностью показаний 0,1 мг, а также проводили измерения шероховатости изнашиваемой поверхности и микротвердости частиц бронз в составе композита. Показано, что добавка в эпоксидной компаунд частиц бронзы не только изменяет кинетику кавитационного изнашивания, но и снижает кавитационную износостойкость полимера. Изменение кинетики заключается в том, что кавитационное изнашивание эпоксидного компаунда с порошковым наполнителем происходит без инкубационного периода, тогда как ненаполненный компаунд изнашивается с выраженным инкубационным периодом. В процессе проведенного исследования сделан вывод о том, что снижение кавитационной износостойкости после добавки частиц бронзы обусловлено тем, что границы между металлической частицей и полимерной матрицей являются «слабым» местом, и именно с этих граничных районов начинается разрушение полимера при кавитационном воздействии.

Ключевые слова: эпоксидный компаунд, порошковый наполнитель, частицы бронзы, ультразвуковой магнитострикционный вибратор, пресная вода, кавитационное воздействие, кинетика кавитационного изнашивания, износ, механизм разрушения поверхности.

Для цитирования:

Фиактистов Я. О. Механизм разрушения эпоксидных композитов с металлическим порошковым наполнителем при кавитационном воздействии / Я. О. Фиактистов, Ю. Н. Цветков, Н. С. Зайцева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 64–72. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-64-72.

Введение (Introduction)

Кавитационное изнашивание является одной из наиболее распространенных причин ремонта судовых движителей [1], [2]. На гребных винтах (ГВ) водоизмещающих судов очаги кавитационного износа возникают в концевых сечениях лопастей [2]. Очаг износа имеет грубую рваную поверхность, что оказывает отрицательное влияние на КПД движителя [3], и при обнаружении первых признаков кавитационного разрушения ГВ ремонтируют. Основной целью ремонта ГВ с очагами износа, расположенными в концевых сечениях лопастей, является восстановление качества поверхности, так как именно в этих районах лопастей данное качество имеет решающее значение для КПД ГВ [4]. Перспективным для восстановления изношенных районов лопастей является использование полимерных материалов, позволяющее существенно снизить трудоемкость ремонта [5], [6]. Как правило, применяют композитные материалы на основе эпоксидных смол; последние отличаются *высокой технологичностью и хорошей адгезией к металлу* [7]. Однако в отличие от ситуации, когда композиты на основе полимерных материалов применяют для изготовления ГВ, в таких композитах для обеспечения общей прочности ГВ используют *волоконистые и тканевые наполнители* [8], в ремонтных составах для обеспечения технологичности используется *порошковый наполнитель* [5], [6].

Известно, что напряжения, возникающие в материале при кавитационном воздействии, носят *локальный характер*, поэтому неоднородность материала: многофазность структуры, наличие твердых включений и т. п., оказывает иное действие на прочность поверхностных слоев при кавитационном воздействии, чем это имеет место при традиционном «объемном» статическом нагружении, когда прочность оценивается *интегральными характеристиками* [9], [10]. Даже при использовании ненаполненных компаундов кавитационное разрушение их поверхности начинается от изначально существующих в них неоднородностей — локализованных дефектов, образовавшихся на поверхности компаунда после полимеризации [11]. По-видимому, частицы порошкового наполнителя должны играть роль *искусственно внесенных в полимер дефектов* и ухудшать его кавитационную износостойкость. Однако сведения о влиянии порошкового наполнителя на кавитационную износостойкость эпоксидного композита имеют противоречивый характер. Так, в работах [12], [13] показано, что порошковые добавки в эпоксидном компаунде ухудшают кавитационную износостойкость получаемого композита по сравнению с ненаполненным эпоксидным компаундом, а в статье [14] отмечается, что, наоборот, повышают. Много неясного также в механизме разрушения поверхности композитов при кавитационном изнашивании. Например, в статье [12] установлено, что разрушение композита при кавитационном воздействии происходит путем отделения частиц наполнителя и распространения трещин от кромок пор в эпоксидной

матрице. В работе [14] утверждается, что при добавке частиц порошкового наполнителя происходит повышение кавитационной износостойкости за счет снижения вероятности хрупкого разрушения, так как наличие частиц наполнителя обеспечивает замедление процесса распространения трещин.

Несмотря на ранее изложенное, при восстановлении очагов кавитационном воздействии продолжают использовать полимерные составы с порошковыми наполнителями, как правило, в виде частиц металлических сплавов (бронз, титановых сплавов). Поэтому целью работы является исследование механизма разрушения эпоксидных составов с порошковым наполнителем из бронзы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследование проводили на образце из эпоксидного компаунда с добавками частиц алюминиевой бронзы. Состав эпоксидного компаунда следующий: 100 частей смолы К-153 и 12 частей отвердителя (полиэтиленполиамина). Использовали бронзу БрАЖНМц9–4–4–1 (ГОСТ 18175–78). Порошок получали опиливанием прутка из указанной бронзы.

Образец для испытания подготовили следующим образом. Из металлопластиковой трубы диаметром 15,5 мм отрезали мерную заготовку высотой примерно 15 мм. Торцы заготовки тщательно шлифовали, а потом установили на липкую ленту, уложенную на жесткой ровной (стеклянной) поверхности липким слоем вверх. В мерном стакане смешали составные части эпоксидного компаунда, добавили в него бронзовый порошок и тщательно перемешали. Полученный состав залили в трубчатую форму, а после полимеризации компаунда торцы образца шлифовали на шкурках разной зернистости и полировали на влажном сукне, не вынимая образец из формы во избежание «заваливания» кромок образца при шлифовании. Затем образец выдавливали из трубчатой формы и провели анализ размеров частиц бронзы в компаунде и их объемной доли в композите на металлографическом микроскопе, оснащенный окуляр-микрометром и фотонасадкой. Предварительно провели калибровку окуляр-микрометра. Анализ выполняли с использованием основных стереометрических соотношений [15]. Как видно из рис. 1, распределение частиц бронзы по размеру подчиняется закону, близкому к показательному [16]. В качестве размера h частиц использовали длину хорды, т. е. длину отрезка, получаемого при случайном пересечении частиц секущей линией [15]. Объемная доля бронзы в образце составила 9,5 %.

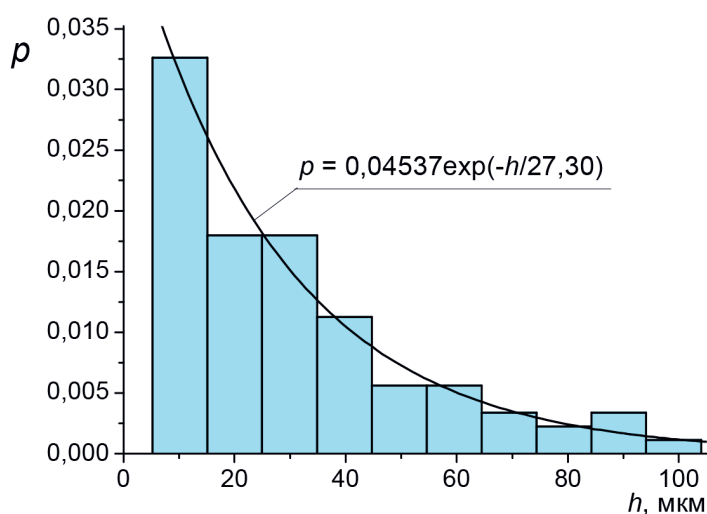


Рис. 1. Распределение частиц бронзы в эпоксидном компаунде

Кавитационное изнашивание образца осуществляли на ультразвуковом магнестрикционном вибраторе (МСВ) УЗДН-2Т (рис. 2). Испытания проводили в пресной воде при температуре $20 \pm 3^\circ\text{C}$.

Образец 5 с помощью крепежной оправки 6 установили в емкость 7 с водой 8 таким образом, чтобы его испытываемая поверхность находилась от торца колеблющегося концентратора 4 на расстоянии 0,5 мм.

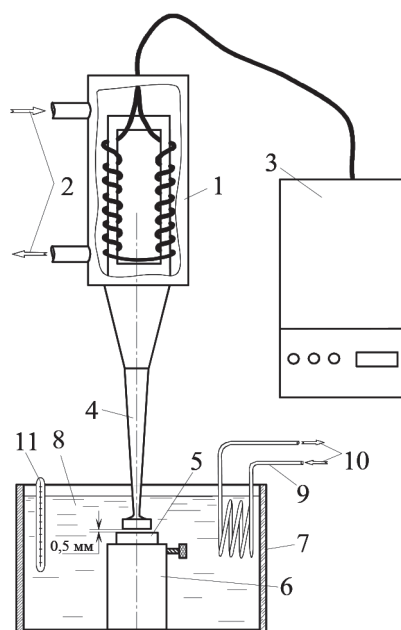


Рис. 2. Схема испытаний на магнитоэстрикционном вибраторе:

- 1 — ультразвуковой излучатель; 2 и 10 — подводы охлаждающей воды;
3 — генератор ультразвуковых колебаний; 4 — концентратор колебаний;
5 — образец; 6 — крепежная оправка; 7 — емкость с водой; 8 — вода;
9 — охлаждающий змеевик; 11 — термометр

Колебания торца концентратора МСВ наблюдались с частотой около 22 кГц и амплитудой 28 мкм. Периодически во время испытаний МСВ выключали, образец вынимали из емкости, высушивали в течение 30 мин и взвешивали на аналитических весах ВЛ-224В с дискретностью показаний 0,1 мг. После этого изнашиваемую поверхность фотографировали с использованием металлографического микроскопа при помощи меток, нанесенных на предметный столик микроскопа, устанавливая каждый раз образец таким образом, чтобы получить фотографию одного и того же участка изнашиваемой поверхности. Это позволило более обоснованно провести анализ изменений, происходящих на изнашиваемой поверхности.

Затем выполнили оценку шероховатости поверхности с помощью прибора *MahrSurf PSI*. Базовая длина составляла 0,8 мм, а длина оценки включала пять базовых длин. Трассирование очага износа при регистрации профиля производили от центра очага к периферии трижды, каждый раз поворачивая образец на 120°. В качестве параметра шероховатости использовали среднее арифметическое отклонение профиля R_a .

После этого измеряли микротвердость бронзовых частиц на изнашиваемой поверхности образца. Значения микротвердости определяли на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор Виккерса, равной 0,196 Н. Последнюю выбирали из условия, чтобы отпечаток находился в пределах сечения частицы. Получали по десять отпечатков, каждый на разных частицах. За окончательный результат брали среднее арифметическое.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

По результатам испытаний построили зависимости потерь массы образца ΔM и среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a от продолжительности t кавитационного воздействия (рис. 3).

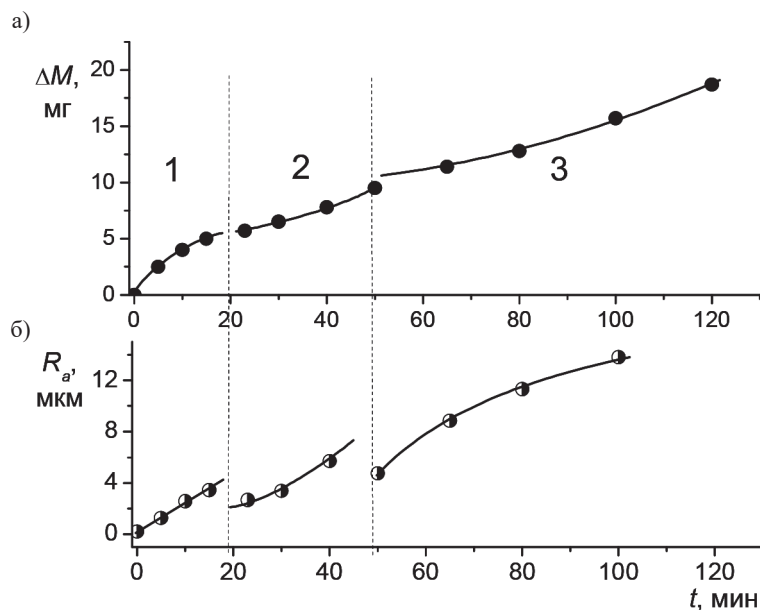


Рис. 3. Зависимость потерь массы образца (а) и высотного параметра шероховатости (б) его поверхности от продолжительности кавитационного воздействия

Из графика $\Delta M(t)$ видно, что кинетика кавитационного изнашивания композита характеризуется отсутствием инкубационного периода, т. е. потери массы начинаются с первых секунд кавитационного воздействия. Процесс изнашивания композита можно разделить на три периода: 1, 2 и 3 (рис. 3). Границами между указанными периодами являются точки, в которых происходит изменение аналитического вида зависимости $\Delta M(t)$. Переход от периода 1 к периоду 2, а затем к периоду 3 сопровождается разрывами на зависимости $R_a(t)$. Если для сравнения посмотреть на кинетику кавитационного изнашивания эпоксидного компаунда того же состава, но без наполнителя (рис. 4), то видно, что она во многом схожа с кинетикой изнашивания металлических материалов, а именно в этом случае четко просматривается *инкубационный период*, т. е. период, когда потери массы практически отсутствуют и условная продолжительность инкубационного периода (обозначена цифрой 1 на рис. 4), определенная согласно рекомендациям [17], составляет около 60 мин.

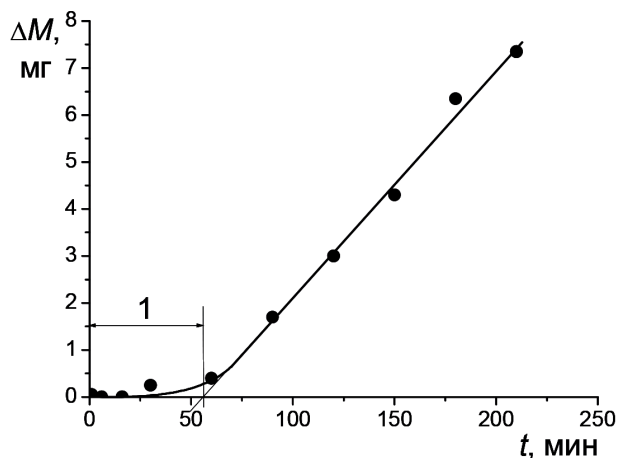


Рис. 4. Зависимость потерь массы ненаполненного эпоксидного компаунда от продолжительности кавитационного воздействия:
1 — условная продолжительность инкубационного периода

Такое очевидное различие в кинетике кавитационного изнашивания ненаполненного и наполненного компаундов обусловлено присутствием в последнем частиц металлического наполнителя.

Анализ фотографий (рис. 5) одного и того же участка изнашиваемой поверхности композита после различной продолжительности кавитационного воздействия показывает, что потери массы в период 1 изнашивания определяются отделением тех частиц бронзы, которые слабо удерживаются в эпоксидной матрице. Для примера на рис. 5 и 6 после 5 мин испытаний места отделения частиц бронзы обведены линиями красного цвета. При этом начинается разрушение участков полимера, примыкающих к частицам наполнителя, о чем свидетельствует появления каемок черного цвета вдоль границ бронзовых частиц: примеры таких участков показаны стрелками синего цвета на рис. 5, б после 5 мин испытаний. Также начинается разрушение полимера, примыкающего к порам, оставшимся от пузырьков воздуха в смоле после ее полимеризации (показаны стрелками зеленого цвета на рис. 5, б). Таким образом, для обеспечения кавитационной износостойкости предпочтительно следует отдавать *гомогенным*, т. е. ненаполненным полимерным составам.

По всей видимости, синхронное появление характерных точек на зависимостях $\Delta M(t)$ и $R_a(t)$ (см. рис. 3) указывает на смену механизмов, обеспечивающих потерю массы образца при изнашивании. На стадии 1 потери массы обусловлены главным образом уносом с поверхности слабо закрепленных частиц бронзы, унос же полимера из областей, примыкающих к частицам наполнителя, не оказывает на этой стадии существенного влияния на изменение массы образца, так как плотность бронзы примерно в 6 раз превышает плотность эпоксидного компаунда. На стадии 2 скорость изнашивания существенно снижается, так как потери металлических частиц почти прекратились, идет накопление повреждений в полимерной матрице в районах, удаленных от частиц бронзы с одновременно продолжающимся удалением полимера из дефектных мест композита: кромок пор, областей, примыкающих к поверхности частиц. На стадии 3 начинается отделение полимера с участков поверхности композита, не примыкающим к частицам бронзы. На фотографиях поверхности после 50 мин воздействия видно существенное потемнение поверхности компаунда, свет отражают только оставшиеся частицы бронзы (рис. 5).

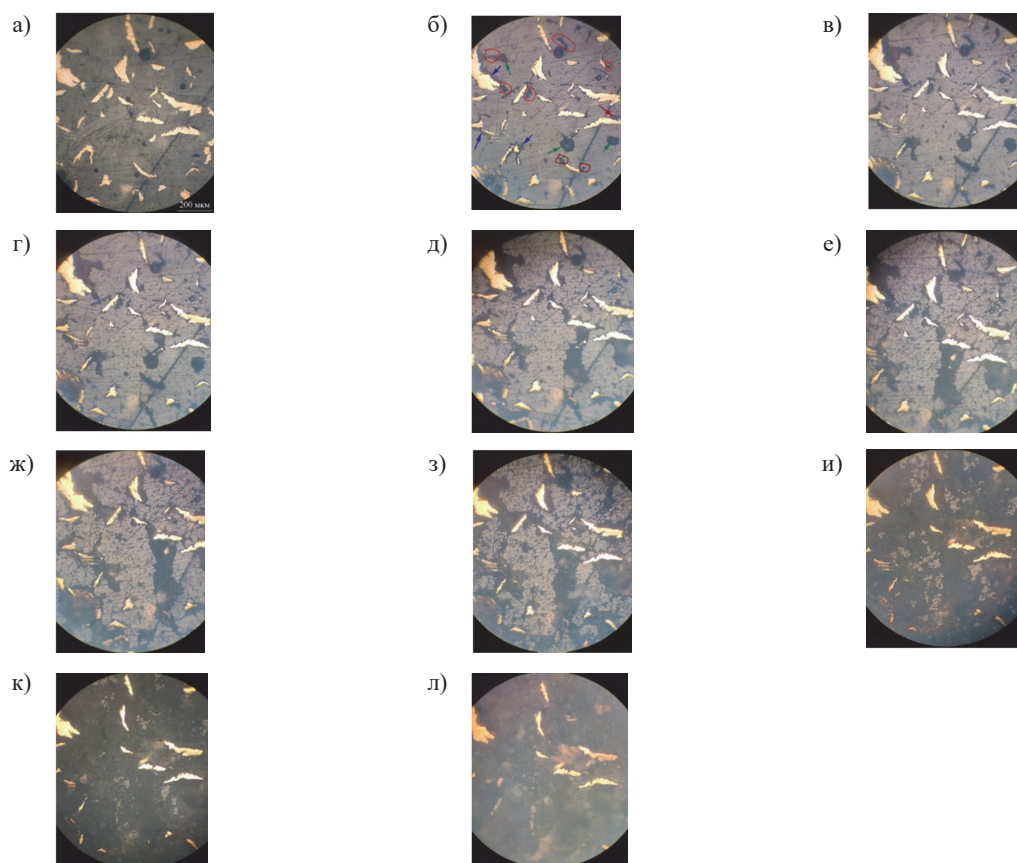


Рис. 5. Вид поверхности композита после различной продолжительности кавитационного воздействия:
а — 0 мин; б — 5 мин; в — 10 мин; г — 15 мин; д — 23 мин; е — 30 мин; ж — 40 мин;
з — 50 мин; и — 65 мин; к — 80 мин; л — 100 мин

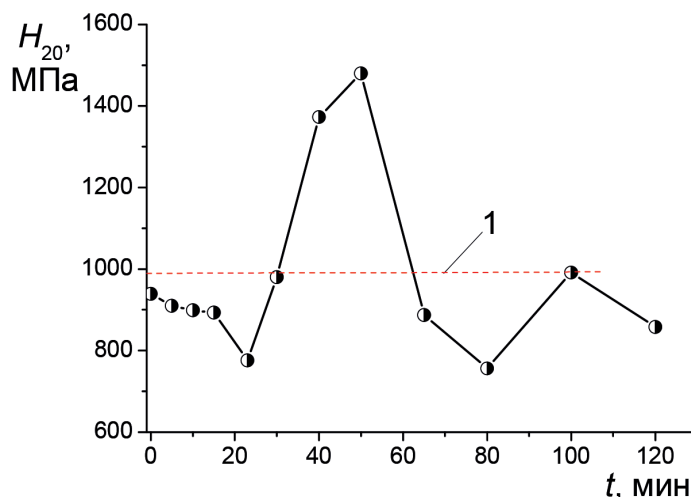


Рис. 6. Изменение микротвердости частиц бронзы с увеличением продолжительности кавитационного воздействия:
1 — микротвердость прутка алюминиевой бронзы, из которого получены частицы

Следует отметить, что несмотря на исходную существенную степень наклепа частиц бронзы, которые получали опилованием бронзового прутка, при кавитационном воздействии на поверхность композита частицы наполнителя испытывают, как показали измерения их микротвердости (рис. 6), значительное упрочнение. Последнее вызвано пластической деформацией частиц при кавитационных ударах. Это значит, что частицы бронзы изменяют свои размеры в плане, поэтому в полимере, примыкающем к поверхности частиц, возникают дополнительные напряжения, что может способствовать его разрушению.

Выводы

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Добавка частиц металлического сплава в полимер на основе эпоксидного компаунда не увеличивает, а наоборот, уменьшает кавитационную износостойкость композита, так как границы между металлической частицей и полимерной матрицей являются *слабым местом*, и именно с этих граничных районов начинается разрушение полимера при кавитационном воздействии.
2. В отличие от ненаполненного эпоксидного компаунда изнашивание композита с наполнителем из металлического порошка происходит без инкубационного периода ввиду того, что практически с первых минут кавитационного воздействия начинается отделение частиц металла, которые слабо удерживаются в полимерной матрице.
3. Образовавшиеся после удаления таких металлических частиц дефектные места в полимерной матрице наряду с существующими дефектами в виде пор служат очагами дальнейшего кавитационного разрушения полимера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Billet M. L. The Specialist Committee on Cavitation Erosion on Propellers and Appendages on High Powered/High Speed Ships / M. L. Billet, M. Mehmel // Proceedings of the 24th ITTC. — UK, 2005. — Vol. III. — Pp. 699–704.
2. Георгиевская Е. П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е. П. Георгиевская. — Л.: Судостроение, 1978. — 206 с.
3. Пустошный А. В. Влияние шероховатости поверхности гребного винта на его пропульсивные характеристики / А. В. Пустошный, А. В. Сверчков, С. П. Шевцов // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № 4 (390). — С. 11–26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26.

4. Кацман Ф. М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна / Ф. М. Кацман. — М.: Транспорт, 1987. — 223 с.
5. Горбаченко Е. О. Кавитационный износ гребных винтов и технологические методы борьбы с ним / Е. О. Горбаченко // Материалы VIII межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 17 мая 2017 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 120–125.
6. Фиактистов Я. О. Ремонт гребных винтов, изношенных при кавитации, с применением полимерных составов / Я. О. Фиактистов // Материалы X межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», 22 мая 2019 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — С. 279–282.
7. Чурсова Л. В. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе / Л. В. Чурсова, Н. Н. Панина, Т. А. Гребнева, И. Ю. Кутергина. — Санкт-Петербург: ЦОП «Профессия», 2020. — 576 с.
8. Yamatogi T. Study on cavitation erosion of composite materials for marine propeller / T. Yamatogi, H. Murayama, K. Uzawa, K. Kageyama, N. Watanabe // 17th International Conference on Composite Materials Edinburgh, Scotland. — 2009.
9. Preece C. M. Cavitation erosion / C. M. Preece // Treatise on Materials Science and Technology, Volume 16: Erosion. — Academic Press New York, 1979. — Pp. 249–308.
10. Фомин В. В. Гидроэрозия металлов / В. В. Фомин. — М.: Машиностроение, 1977. — 287 с.
11. Garcia G. L. Cavitation resistance of epoxy-based multilayer coatings: Surface damage and crack growth kinetics during the incubation stage/ G. L. Garcia, V. Lopez-Rios, A. Espinosa, J. Abenojar, F. Velasco, A. Toro // Wear. — 2014. — Vol. 316. — Is. 1–2. — Pp. 124–132. DOI: 10.1016/j.wear.2014.04.007
12. Correa C. E. Wear mechanisms of epoxy-based composite coating submitted to cavitation/ C. E. Correa, G. L. Garcia, A. N. Garcia, W. Bejarano, A. A. Guzman, A. Toro // Wear. — 2011. — № 271. — Is. 9–10. — Pp. 2274–2279. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.088
13. Qiu N. Research on cavitation erosion and wear resistance performance of coatings / N. Qiu, L. Wang, S. Wu, D. S. Likhachev // Engineering Failure Analysis. — 2015. — Vol. 55. — Pp. 208–223. DOI: 10.1016/j.eng-failanal.2015.06.003
14. Abenojar J. Erosion-wear, mechanical and thermal properties of silica filled epoxy nanocomposites / J. Abenojar, J. Tutor, Y. Ballesteros, J. C. del Real, M. A. Martinez // Composites Part B: Engineering. — 2017. — Vol. 120. — Pp. 42–53. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.03.047
15. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. — М.: Металлургия, 1976. — 271 с.
16. Гурский Е. И. Теория вероятностей с элементами математической статистики / Е. И. Гурский. — М.: Высшая школа, 1971. — 328 с.
17. ASTM G32–10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. — ASTM International, 2010. — 19 p.

REFERENCES

1. Billet, Michael L., and Manfred Mehmel. “The Specialist Committee on Cavitation Erosion on Propellers and Appendages on High Powered/High Speed Ships.” *Proceedings of the 24th ITTC*. Vol. III. UK, 2005. 699–704.
2. Georgievskaya, E. P. *Kavitatsionnaya eroziya grebnykh vintov i metody bor'by s nei*. L.: Sudostroenie, 1978.
3. Pustoshny, Alexander V., Andrey V. Sverchkov, and Sergey P. Shevtsov. “Roughness of propeller blade surface and its implications for propulsion performance.” *Transactions of the Krylov state research centre* 4(390) (2019): 11–26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26/
4. Katsman, F. M. *Ekspluatatsiya propul'sivnogo kompleksa morskogo sudna*. M.: Transport, 1987.
5. Gorbachenko, E. O. “Kavitatsionnyi iznos grebnykh vintov i tekhnologicheskie metody bor'by s nim.” *Materialy VIII mezhvuzovskoi nauch.-praktich. konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017. 120–125.
6. Fiaktistov, Ya. O. “Remont grebnykh vintov, iznoshennykh pri kavitatsii, s primeneniem polimernykh sostavov.” *Materialy X mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019. 279–282.

7. Chursova, L. V., N. N. Panina, T. A. Grebneva, and I. Yu. Kutergina. *Epoksidnye smoly, otverditeli, modifikatory i svyazuyushchie na ikh osnove*. Sankt-Peterburg: TsOP «Professiya», 2020.
8. Yamatogi, Toshio, Hideaki Murayama, Kiyoshi Uzawa, Kazuro Kageyama, and Naoko Watanabe. “Study on cavitation erosion of composite materials for marine propeller.” *17th International Conference on Composite Materials Edinburgh, Scotland*. 2009.
9. Preece, C. M. “Cavitation erosion”. *Treatise on Materials Science and Technology, Volume 16: Erosion*. New York: Academic Press, 1979. 249–308.
10. Fomin, V. V. *Gidroeroziya metallov*. M.: Mashinostroenie, 1977.
11. Garcia, G. L., V. Lopez-Rios, A. Espinosa, J. Abenojar, F. Velasco and A. Toro. “Cavitation resistance of epoxy-based multilayer coatings: Surface damage and crack growth kinetics during the incubation stage.” *Wear* 316.1–2 (2014): 124–132. DOI: 10.1016/j.wear.2014.04.007.
12. Correa, C. E., G. L. Garcia, A. N. Garcia, W. Bejarano, A. A. Guzman, and A. Toro. “Wear mechanisms of epoxy-based composite coating submitted to cavitation.” *Wear* 271.9–10 (2011): 2274–2279. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.088.
13. Qiu, Ning, Leqin Wang, Suhuan Wu, and Dmitriy S. Likhachev. “Research on cavitation erosion and wear resistance performance of coatings.” *Engineering Failure Analysis* 55 (2015): 208–223. DOI: 10.1016/j.eng-failanal.2015.06.003.
14. Abenojar, J., J. Tutor, Y. Ballesteros, J. C. del Real, and M. A. Martinez. “Erosion-wear, mechanical and thermal properties of silica filled epoxy nanocomposites.” *Composites Part B: Engineering* 120 (2017): 42–53. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.03.047.
15. Saltykov, S. A. *Stereometricheskaya metallografiya*. M.: Metallurgiya, 1976.
16. Gurskii, E. I. *Teoriya veroyatnostei s elementami matematicheskoi statistiki*. M.: Vysshaya shkola, 1971.
17. *ASTM G32–10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus*. ASTM International, 2010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фиактистов Ярослав Олегович —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: yaroslav3373@mail.ru, kaf_tsr@gumrf.ru

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru

Зайцева Наталия Сергеевна — инженер-технолог
АО «Адмиралтейские верфи»
190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
наб. р. Фонтанки, 203
e-mail: nati.zaytseva@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fiaktistov, Yaroslav O. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: yaroslav3373@mail.ru, kaf_tsr@gumrf.ru

Tsvetkov, Yuriy N. — Dr. 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

Zaytseva, Nataliya S. — Production Engineer
JSC “Admiralty Shipyards”
203, Fontanka Emb., St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: nati.zaytseva@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 10 января 2023 г.
Received: January 10, 2023.