

INFLUENCE OF THE BRONZE POWDER FILLER ON THE ADHESION OF EPOXY COMPOUND TO ALUMINUM BRONZE

Y. N. Tsvetkov¹, N. M. Vihrov², Y. O. Fiaktistov¹

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

² — JSC “KSZ”, St. Petersburg, Russian Federation

The tests to determine the adhesion of epoxy compound K-153, containing different amount of bronze powder, to aluminum bronze are carried out. As the bronze powder the filings, which are obtained by filing the rolled rod of bronze BrAZhNMts9–4–4–1, are used. The conventional size of the bronze particles amounts to 18 μm . The epoxy compositions are applied over the plates made out of BrAZhNMts9–4–4–1. The mentioned bronze is chosen as close analogue by composition to bronze BrA9Zh4N4L, used to cast ship propellers. The plates thickness is 4...5 mm, and the plates dimensions in plan are equal to approximately 50 by 100 mm. Before being coated the plates are ground with abrasive paper of different grain to obtain the arithmetical mean deviation of the surface profile equal to 0,5...0,900 μm . Coating the plates and aging the coatings are produced at temperature of $19\pm 1^\circ\text{C}$ and ambient air relative humidity of $50\pm 5\%$. The average thickness of the coating amounts to 2,1 mm. The experiments are conducted after keeping the epoxy coating during 7 days. The tests are carried out according to the scheme, regulated by the GOST 32299–2013 “Paint materials. Pull-off test for adhesion”. According to the scheme, metallic cylinders of the 19 mm diameter are stuck to the coating; preliminarily the spots of sticking are processed with abrasive cloth and solvent. Then the circular cuts are made in the coating around each cylinder and the cylinders are pulled off under the force directed perpendicularly to the coating, and the peel strength is recorded. The addition of bronze powder into the epoxy compound does not affect the peel strength that is the precipitation of the bronze particles in the epoxy compound during its hardening does not result in the decrease in the contact area of the epoxy resin with the bronze surface. This conclusion is confirmed by the calculation estimation: the calculated thickness of the resin layer in between a bronze particle and the plate surface after the completion of resin hardening is three orders of magnitude greater than the diene resin molecule size. It means that epoxy resin viscosity is too high, and the size and the mass of the particles are too small in order for the squeezing the resin, even partial, from under the particles takes place during the slow precipitation of the particles.

Keywords: epoxy resin, hardener, filler, aluminum bronze, bronze powder, bronze particle size, adhesion, bronze plates, epoxy coating, peel strength.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., Nikolay M. Vihrov, and Yaroslav O. Fiaktistov. “Influence of the bronze powder filler on the adhesion of epoxy compound to aluminum bronze.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 282–289. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-282-289.

УДК 669.35 + 620.179

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ БРОНЗОВОГО ПОРОШКА НА АДГЕЗИЮ ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА К АЛЮМИНИЕВОЙ БРОНЗЕ

Ю. Н. Цветков¹, Н. М. Вихров², Я. О. Фиактистов¹

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

² — ЗАО «Канонерский судоремонтный завод», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведены испытания на адгезию эпоксидного компаунда K-153, содержащего разное количество бронзового порошкового наполнителя. В качестве бронзового порошка были использованы бронзовые опилки, полученные опиливанием катаного прутка из алюминиевой бронзы BrAЖНМц9–4–4–1. Условный размер частиц бронзы оценивали по значению средней длины хорды сечения частиц, составляющему 18 мкм. Эпоксидные составы наносили на пластины из бронзы BrAЖНМц9–4–4–1. Указанная бронза выбрана

как очень близкая по составу к бронзе БрА9Ж4Н4Л, применяемой для литья гребных винтов. Толщина пластин 4–5 мм, размеры пластин в плане составляли примерно 50 × 100 мм. Пластины перед заливкой компаундом шлифовали на шкурках разной зернистости, среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности пластин находилось в диапазоне 0,500 ... 0,900 мкм. Заливка и выдержка пластин производились при температуре $19 \pm 1^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $50 \pm 5\%$. Средняя толщина эпоксидного покрытия на пластинах составила 2,1 мм. Эксперименты на адгезию проводили после выдержки эпоксидного покрытия в течение семи дней. Испытания проводили по схеме, регламентированной ГОСТом 32299–2013 «Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва с использованием механического адгезиметра». Согласно данной схеме к покрытию приклеивали металлические грибки диаметром 19,5 мм, предварительно обработав места приклеивания шкуркой и протерев их растворителем. После этого вокруг каждого грибка делали круговой вырез в покрытии, отрывали грибки под действием усилия, направленного перпендикулярно покрытию, и регистрировали прочность на отрыв. Было установлено, что добавка металлического порошка не оказывает влияния на значение прочности отрыва, т. е. осаждение частиц бронзы в эпоксидном компаунде при его отверждении не приводит к уменьшению площади контакта эпоксидной смолы с поверхностью бронзы. Этот вывод подтверждается также расчетным способом: оценка толщины слоя эпоксидной смолы между частицей бронзы и поверхностью пластины показала, что к моменту полного отверждения эпоксидного компаунда толщина указанного слоя на три порядка превысит размер молекулы диановой смолы. Значит, вязкость эпоксидных смол слишком высока, а размеры и масса частиц используемых металлических порошковых наполнителей слишком малы, чтобы имело место хотя бы частичное выжимание смолы из-под частицы при ее медленном погружении.

Ключевые слова: эпоксидная смола, отвердитель, наполнитель, алюминиевая бронза, бронзовый порошок, размер частиц бронзы, адгезия, бронзовые пластины, эпоксидное покрытие, прочность на отрыв.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Влияние добавки бронзового порошка на адгезию эпоксидного компаунда к алюминиевой бронзе / Ю. Н. Цветков, Н. М. Вихров, Я. О. Фиакистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 282–289. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-282-289.

Введение (Introduction)

Эпоксидные компаунды находят все более широкое применение в технике вследствие большого количества преимуществ [1], [2] по сравнению с другими полимерами. В судоремонте их используют при монтаже оборудования в корпусе судна и восстановлении изношенных поверхностей деталей судового оборудования [3], в частности при ремонте лопастей гребных винтов с очагами кавитационного износа на их поверхности [4]. Кавитационное изнашивание гребных винтов является распространенным явлением на водном транспорте [5], [6]. На гребном винте каждого четвертого морского транспортного судна возникают очаги кавитационного износа [6], при этом в отличие от быстроходных судов, на транспортных в основном очаги кавитационного износа возникают на концевых сечениях лопастей, что оказывает отрицательное влияние на КПД винта [7], [8]. Вместе с тем концевые сечения лопастей не испытывают таких нагрузок, как корневые сечения, поэтому вопросы прочности при устранении очагов кавитационного износа на их поверхности при ремонте отходят на второй план. На первое место выходит восстановление качества поверхности, поэтому направление ремонта, основанного на применении эпоксидных составов, может оказаться перспективным. Указанное направление будет активно развиваться в случае, если будет успешно решен вопрос повышения долговечности применяемых составов в условиях кавитационного воздействия.

Опыт эксплуатации гребных винтов с очагами кавитационного износа, заделанными эпоксидными ремонтными составами показывает, что долговечность таких покрытий зависит не только от их кавитационной износостойкости, но также в не меньшей мере от их адгезии к материалу лопасти. Эпоксидные материалы имеют значительно лучшую адгезию к металлам по сравнению с другими полимерами [1], [9]. Тем не менее и у эпоксидных смол уровень адгезии к металлам недостаточен и более чем на порядок ниже прочности самого эпоксидного материала. Поэтому граница между полимерным составом, ограничивающим район заделки очага износа на лопасти,

и материалом лопасти является слабым местом с точки зрения долговечности. Существуют разные теории адгезии [10]–[12]. Повышению адгезии эпоксидных составов уделяется серьезное внимание, однако многие вопросы недостаточно освещены в научных публикациях. Известно, что многие эпоксидные составы применяются с различными порошковыми наполнителями (например, используются порошки бронзы, титана и других металлов). При этом вопрос о влиянии этих наполнителей на адгезию эпоксидного компаунда с ремонтируемой поверхностью, в частности с поверхностью лопастей гребных винтов, остается открытым.

Целью работы является оценка влияния добавок бронзового порошка на адгезию эпоксидного компаунда к алюминиевой бронзе (как самому распространенному материалу гребных винтов).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для исследований выбрали следующий эпоксидный состав: модифицированная эпоксидная смола (компаунд) К-153 и отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА). Содержание отвердителя составило 10,7 % об. (100 частей смолы и 12 частей отвердителя). На основе указанного компаунда было подготовлено четыре состава, с разным содержанием бронзового порошка, а именно: 0, 5, 15 и 25 % по объему.

В качестве бронзового порошка использовали бронзовые опилки, которые получали опиливанием катаного прутка из алюминиевой бронзы БрАЖНМц9–4–4–1. Гистограмма распределения частиц бронзы по значению длины хорды их сечения представлена на рис. 1.

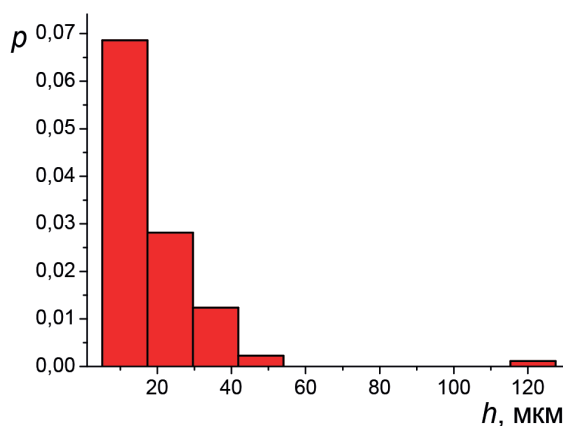


Рис. 1. Гистограмма распределения частиц бронзы по размеру
Fig. 1. Histogram of bronze particles size distribution

Длину хорды частиц определяли на шлифе покрытия методом случайной секущей прямой [13], в качестве которой использовали линейку окуляр-микрометра металлографического микроскопа. Условный размер частиц бронзы оценивали по средневзвешенному значению длины h_{cp} хорды сечения частиц. Значение h_{cp} рассчитывали следующим образом:

$$h_{cp} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z h_i,$$

где h_i — длина хорды при пересечении секущей прямой с i -й частицей бронзы;
 z — общее число хорд, полученное на всех секущих линиях.

Размер частиц бронзы составил $h_{cp} = 18$ мкм.

Для оценки адгезии эпоксидные составы наносили также на пластины из бронзы БрАЖНМц9–4–4–1, очень близкой по составу к бронзе БрА9Ж4Н4Л, применяемой для литья гребных винтов. Толщина пластин составила 4–5 мм, размеры пластин в плане — примерно 50×100 мм. Пластины вырезали из катаного прутка, затем поверхность фрезеровали, шлифовали вручную абразивной шкуркой Mirca (P220). Параметр шероховатости Ra рабочей поверхности находился в диапазоне 0,500...0,900 мкм.

Перед нанесением эпоксидного состава по периметру каждой пластины сделали бортики из пластилина для предотвращения стекания эпоксидного компаунда в процессе заливки пластин и затвердевания. После этого поверхности пластин протирали вначале растворителем «Калоша», затем этиловым спиртом, потом высушивали и только после этого производили заливку пластин эпоксидным компаундом.

Испытания проводили по схеме (рис. 2), регламентированной ГОСТом 32299–2013, с использованием механического адгезиметра Novotest АМЦ-1. Согласно этой схеме к покрытию приклеивали металлические грибки диаметром $D = 19,5$ мм, предварительно обработав места приклеивания шкуркой и протерев растворителем. После этого вокруг каждого грибка делали круговой вырез в покрытии и грибки отрывали под действием усилия, направленного перпендикулярно покрытию, и регистрировали прочность на отрыв $p_{отр}$, МПа.

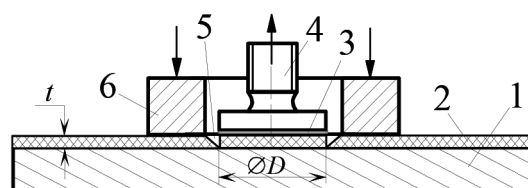


Рис. 2. Схема испытаний на адгезию:

1 — бронзовая пластина; 2 — эпоксидное покрытие; 3 — клей;
4 — грибок; 5 — круговой вырез в покрытии; 6 — упорное кольцо

Fig. 2. Adhesion test scheme:

1 — bronze plate; 2 — epoxy coating; 3 — glue;
4 — dowel; 5 — circular cut in the coating; 6 — thrust ring

Каждым составом заливали по две пластины (рис. 3). Заливку и выдержку пластин выполняли при температуре 19 ± 1 °С и относительной влажности воздуха 50 ± 5 %. Средняя толщина t эпоксидного покрытия на пластинах (см. рис. 2) составила 2,1 мм. Эксперименты на адгезию проводили после выдержки эпоксидного покрытия в течение семи дней.

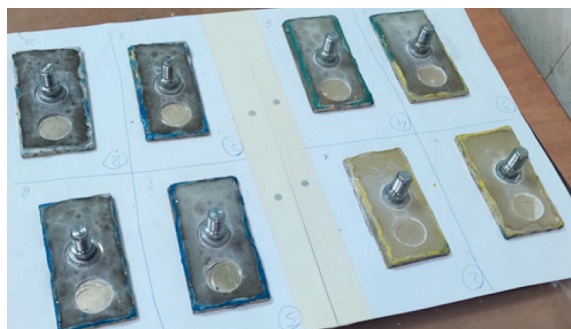


Рис. 3. Бронзовые пластины, залитые эпоксидным компаундом с разным содержанием порошка бронзы

Fig. 3. Bronze plates coated with epoxy compound with different contents of bronze powder

В процессе проведения испытаний на адгезию отрыв покрытия от пластин происходил по границе между покрытием и металлом (см. рис. 3). Для каждого состава произвели отрыв шести грибков, взяв за окончательный результат среднее арифметическое значение по шести измерениям.

Результаты (Results)

Результаты эксперимента представлены в виде графика $p_{отр}(V_{отн})$ на рис. 4, на основе анализа которого можно сделать следующие важные выводы:

1. Полученное значение прочности на отрыв компаунда без добавок бронзовых частиц $p_{отр} = 2,3 \pm 1,6$ МПа при 70 %-й доверительной вероятности. Если сравнить это значение со значением предела прочности эпоксидного компаунда ($\sigma_b = 63,3$ МПа), полученного ранее при испытании на одноосное растяжение¹, то можно сделать вывод о том, что адгезионная прочность примерно в 30 раз уступает когезионной прочности эпоксидного компаунда. Это является косвенным объяснением того, почему кавитационное разрушение начинается с границ между частицами наполнителя и эпоксидным связующим [14] и почему добавление частиц в эпоксидный компаунд не изменяет хрупкий характер его кавитационного разрушения.

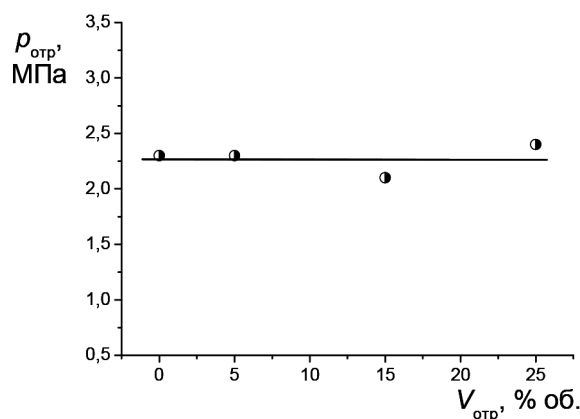


Рис. 4. Влияние содержания бронзовых частиц в эпоксидном компаунде К-153 на давление отрыва эпоксидного покрытия от поверхности пластин из бронзы БрАЖНМц9–4–4–1

Fig. 4. The influence of the bronze particles content in the epoxy compound K-153 on the peeling pressure of the epoxy coating from the surface of plates made of bronze BrAZHNMts9–4–4–1

2. Добавка металлического порошка не оказывает влияния на значение прочности отрыва. Это значит, что осаждение частиц бронзы в эпоксидном компаунде при его отверждении не приводит к уменьшению площади контакта эпоксидной смолы с поверхностью бронзы.

Следует отметить, что в работе [15] выполнены исследования влияния добавок порошка цинка на адгезию эпоксидной смолы к пластинкам нержавеющей стали, оценка которой выполнялась, согласно китайскому стандарту GB/T 2791–1995, по усилию отрыва одной гибкой стальной пластинки от другой, склеенных эпоксидным составом. Частицы цинка имели размер около 37 мкм, опыты проводили с частицами цинка сферической и хлопьевидной формы. Перед добавкой в эпоксидную смолу порошок цинка проходил специальную обработку для повышения адгезии смолы к цинку.

Опыты показали, что с увеличением содержания цинкового порошка до 5 % по массе усилие отрыва сначала увеличивается примерно на 50 % при добавке хлопьевидных частиц и 10 % при добавке сферических частиц. При дальнейшем увеличении содержания цинка от 5 % до 30 % по массе усилие отрыва постепенно снижается, выходя на постоянный уровень. Однако в работе не уточняется характер отрыва (адгезионный, когезионный или смешанный) и толщина слоя эпоксидного компаунда между стальными пластинками. Если толщина слоя не превышала среднего размера частиц цинка, то частицы контактировали с пластинами, а значит, снижение усилия отрыва с увеличением концентрации порошка цинка объясняется уменьшением площади контакта эпоксидной смолы с поверхностью стальных пластин. Что касается результатов, полученных в настоящем исследовании, то второй вывод относительно зависимости $p_{отр}(V_{отн})$ подтвержден в следующем разделе статьи расчетным способом.

¹ Опыты на одноосное растяжение проводили на образцах цилиндрического сечения, изготовленных по ГОСТу 11262–80 «Пластмассы. Метод испытаний на растяжение».

Анализ результатов (Analysis of the results)

Воспользуемся для оценки толщины слоя компаунда между частицами бронзового порошка и поверхностью бронзовой пластины уравнением Стефана – Рейнольдса, описывающего кинетику утончения слоя вязкой жидкости между двумя дисками [16]:

$$\tau = \frac{3\pi\eta r^4}{4F_N} \left(\frac{1}{\delta_{\text{ост}}^2} - \frac{1}{\delta_{\text{н}}^2} \right),$$

где τ — время изменения расстояния между дисками от начального значения $\delta_{\text{н}}$ до расстояния $\delta_{\text{ост}}$, равного остаточной толщине слоя жидкости;

η — динамическая вязкость выжимаемой жидкости;

r — радиус дисков;

F_N — сила, сжимающая диски.

Примем форму бронзовой частицы в виде диска диаметром и высотой, равными средней длине хорды $h_{\text{ср}}$ сечения частиц, т. е. 18 мкм. Тогда сила, сжимающая бронзовую частицу и пластину, зазор между которыми заполнен эпоксидной смолой, будет равна весу такой частицы, т. е.

$$F_N = \pi(0,5h_{\text{ср}})^2 h_{\text{ср}} \rho_{\text{бп}} g = 3,14 \cdot 9^2 \cdot 9 \cdot 7,65 \cdot 10^{-15} \cdot 9,8 = 1,7 \cdot 10^{-10} \text{ Н.}$$

Согласно паспорту на эпоксидный компаунд К-153, его вязкость $\eta \approx 8$ Па·с при 25 °С. С учетом того, что время желатинизации смолы К-153 составляет 160 мин, примем $\tau = 160$ мин — время, в течение которого еще возможно какое-то движение бронзовой частицы к пластине при осаждении. В качестве начального расстояния $\delta_{\text{н}}$ между частицей и пластиной примем половину среднего значения толщины покрытия на пластинах, т. е. $\delta_{\text{н}} \approx 1$ мм. Тогда из формулы, приведенной на с. 284, определим

$$\delta_{\text{ост}} = \left(\frac{4F_N\tau}{3\pi\eta r^4} + \frac{1}{\delta_{\text{н}}^2} \right)^{-0,5} = \left(\frac{4 \cdot 1,7 \cdot 10^{-10} \cdot 9600}{3 \cdot 3,14 \cdot 8 \cdot 9 \cdot 10^{-24}} + \frac{1}{0,001^2} \right)^{-0,5} = 2,8 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,27 \text{ мкм.}$$

В работе [17] указывается, что объем молекулы эпоксидной смолы (до отверждения) составляет около $0,3 \text{ нм}^3$, а значит средний линейный размер молекулы равен примерно 0,7 нм. Как видно, полученное значение примерно на три порядка меньше рассчитанного значения $\delta_{\text{ост}}$, т. е. несмотря на то, что и происходит процесс осаждения микрочастиц бронзы в эпоксидной смоле, он не является завершенным и фактически бронзовые частицы остаются в смоле в подвешенном состоянии. Иными словами, выдавливание смолы из-под частиц не происходит.

Заключение (Conclusion)

Добавка металлического порошка в эпоксидный компаунд не оказывает влияния на значение прочности отрыва эпоксидного компаунда от поверхности алюминиевой бронзы, т. е. осаждение частиц бронзы в эпоксидном компаунде при его отверждении не приводит к уменьшению площади контакта эпоксидной смолы с поверхностью бронзы. Таким образом, вязкость эпоксидных смол слишком высока, а размеры и масса частиц используемых металлических порошковых наполнителей слишком малы, чтобы имело место хотя бы частичное выжимание смолы из-под частицы при ее медленном погружении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чурсова Л. В. Эпоксидные смолы, отвердители. Модификаторы и связующие на их основе / Л. В. Чурсова, Н. Н. Панина, Т. А. Гребенева, И. Ю. Кутергина. — СПб.: ЦОП «Профессия», 2020. — 576 с.
2. Zhang Y. Adhesion of epoxy coating to an alloy-coated steel sheet. Doctor of Philosophy thesis, Department of Materials Engineering, University of Wollongong / Y. Zhang. — 1995. — 255 p.
3. Buketov A. New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships / A. Buketov, S. Smetankin, P. Maruschak, K. Yurenin, O. Sapronov, V. Matvyeyev, A. Menou // Transport. — 2020. — Vol. 35. — No. 6. — Pp. 679–690. DOI: 10.3846/transport.2020.14286.

4. *Фиактистов Я. О.* Ремонт гребных винтов, изношенных при кавитации, с применением полимерных составов / Я. О. Фиактистов // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России. 22 мая 2019 года / Материалы X межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2019. — С. 279–282.
5. *Георгиевская Е. П.* Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е. П. Георгиевская. — Л.: Судостроение, 1978. — 206 с.
6. *Цветков Ю. Н.* Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
7. *Кацман Ф. М.* Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна / Ф. М. Кацман. — М.: Транспорт, 1987. — 223 с.
8. *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.
9. *Schmidt R.* Epoxy adhesion to metals / R. Schmidt, J. Bell // Epoxy Resins and Composites II. Advances in Polymer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. — Vol.75. — Pp. 33–71. DOI: 10.1007/BFb0017914.
10. *Ghanem A.* Introduction to polymer adhesion. — 2017 [Электронный ресурс] / A. Ghanem, Y. Lang. — Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/319098070> (дата обращения: 25.03.2024).
11. *Wei H.* Adhesion and cohesion of epoxy-based industrial composite coatings / H. Wei, J. Xia, W. Zhou, L. Zhou, G. Hussain, Q. Li, K. K. Ostrikov // Composites Part B: Engineering. — 2020. — Vol. 193. — Pp. 108035. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108035.
12. *De Bruyne N. A.* The adhesive properties of epoxy resins / N. A. De Bruyne // Journal of Applied Chemistry. — 1956. — Vol. 6. — Is. 7. — Pp. 303–310. DOI: 10.1002/jctb.5010060708.
13. *Салтыков С. А.* Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. — М.: Металлургия, 1976. — 271 с.
14. *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.
15. *Luo X.* Enhancement of Mechanical Properties and Bonding Properties of Flake-Zinc-Powder-Modified Epoxy Resin Composites / X. Luo, Y. Li, S. Li, X. Liu // Polymers. — 2022. — Vol. 14. — Is. 24. — Pp. 5323. DOI: 10.3390/polym14235323.
16. *Ахматов А. С.* Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. — М.: Физматгиз, 1963. — 472 с.
17. *Yamamoto S.* Molecular size effect on curing process for epoxy and amine mixture / S. Yamamoto, K. Tanaka // Nihon Reorji Gakkaishi. — 2021. — Vol. 49. — Is. 2. — Pp. 55–60. DOI: 10.1678/rheology.49.55.

REFERENCES

1. Chursova, L. V., N. N. Panina, T. A. Grebeneva, and I. Yu. Kutergina. *Epoksidnye smoly, otverditeli. Modifikatory i svyazuyushchie na ikh osnove*. SPb.: TsOP «Professiya», 2020.
2. Zhang, Youlai. Adhesion of epoxy coating to an alloy-coated steel sheet. Doctor of Philosophy thesis, Department of Materials Engineering, University of Wollongong. 1995.
3. Buketov, Andriy, Serhiy Smetankin, Pavlo Maruschak, Kyrlyo Yurenin, Oleksandr Saponov, Viktor Matvyeyev, and Abdellah Menou. “New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships.” *Transport* 35.6 (2020): 679–690. DOI: 10.3846/transport.2020.14286.
4. Fiaktistov, Ya. O. “Remont grebnykh vintov, iznoshennykh pri kavitatsii, s primeneniem polimernykh sostavov.” *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii. 22 maya 2019 goda. Materialy X mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2019. 279–282.
5. *Georgievskaya, E. P.* *Kavitatsionnaya eroziya grebnykh vintov i metody bor'by s nei*. L.: Sudostroenie, 1978.
6. *Tsvetkov, Yu. N.* *Kavitatsionnoe iznashivanie metallov i oborudovaniya*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003.
7. *Katsman, F. M.* *Ekspluatatsiya propul'sivnogo kompleksa morskogo sudna*. M.: Transport, 1987.
8. *Pustoshny, A. V., A. V. Sverchikov, and S. 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.

9. Schmidt, Randall G., and James P. Bell. "Epoxy adhesion to metals." *Epoxy Resins and Composites II. Advances in Polymer Science*. Vol. 75. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. 33–71. DOI: 10.1007/BFb0017914.
10. Ghanem, Amyl, and Yujie Lang. "Introduction to polymer adhesion." Web. 25 March 2024 <<https://www.researchgate.net/publication/319098070>>.
11. Wei, Hongyu, Jun Xia, Wanlin Zhou, Laishui Zhou, Ghulam Hussain, Qin Li, and Kostya (Ken) Ostrikov. "Adhesion and cohesion of epoxy-based industrial composite coatings." *Composites Part B: Engineering* 193 (2020): 108035. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108035.
12. De Bruyne, N.A. "The adhesive properties of epoxy resins." *Journal of Applied Chemistry* 6.7 (1956): 303–310. DOI: 10.1002/jctb.5010060708.
13. Saltykov, S. A. *Stereometricheskaya metallografiya*. M.: Metallurgiya, 1976.
14. Fiaktistov, Yaroslav O., Yuriy N. Tsvetkov, and Nataliya S. Zaytseva. "Destruction mechanisms of epoxybased 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.
15. Luo, Xu, Yu Li, Shuaijie Li, and Xin Liu. "Enhancement of mechanical properties and bonding properties of flake-zinc-powder-modified epoxy resin composites." *Polymers* 14.23 (2022): 5323. DOI: 10.3390/polym14235323.
16. Akhmatov, A. S. *Molekulyarnaya fizika granichnogo treniya*. M.: Fizmatgiz, 1963.
17. Yamamoto, Satoru, and Keiji Tanaka. "Molecular size effect on curing process for epoxy and amine mixture." *Nihon Reoroji Gakkaishi* 49.2 (2021): 55–60. DOI: 10.1678/rheology.49.55.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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
Вихров Николай Михайлович —
доктор технических наук, профессор
ЗАО «Канонерский судоремонтный завод»
198184, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Канонерский остров, 41
e-mail: n.vihrov@inbox.ru
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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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
Vihrov, Nikolay M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
JSC "KSZ"
41 Kanonersky ostrov, St. Petersburg, 198184,
Russian Federation
e-mail: n.vihrov@inbox.ru
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

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2024 г.
Received: April 3, 2024.