

На правах рукописи

Фиактистов Ярослав Олегович

**ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКОВОГО
НАПОЛНИТЕЛЯ НА КАВИТАЦИОННУЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ
ЭПОКСИДНОГО КОМПАУНДА ДЛЯ РЕМОНТА ГРЕБНЫХ
ВИНТОВ**

2.5.19 Технология судостроения, судоремонта и организация
судостроительного производства

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Цветков Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: **XXXXXXXXXXXXXXXX**
ТЫ:

YYYYYYYYYYYYYYYY

Ведущая организация: **ZZZZZZZZZZZZZZZZZZZZ.**

Защита состоится на заседании диссертационного совета 45.2.003.01 при ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» по адресу: 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7, ауд. 235а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»: https://gumrf.ru/naudejat/gna/dissov_22300904/zd22300904

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета

Жуков Владимир Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Гребной винт (ГВ) транспортно-го судна — сложное дорогостоящее изделие, от состояния которого зависит ходкость судна и безопасность мореплавания. Кавитационному изнашиванию подвержены лопасти ГВ примерно каждого четвертого морского транспортного судна. На ГВ таких судов очаги износа возникают, как правило, в концевых сечениях лопастей, что снижает КПД двигателя, поэтому при появлении кавитационного износа ГВ подлежит ремонту. Традиционным методом ремонта лопастей ГВ является наплавка. Основной недостаток наплавки — высокая трудоёмкость. Перспективная альтернатива этому методу — экспресс-технологии, основанные на нанесении быстродействующих эпоксидных составов на поврежденную поверхность лопасти, используемые на отечественных и зарубежных судоремонтных предприятиях. Однако широкое применение эпоксидных составов сдерживается их неудовлетворительной кавитационной износостойкостью, которая на порядок ниже износостойкости металлов. Неоправданным является широкое применение в отечественном судоремонте импортных составов на основе эпоксидных смол по причине их высокой стоимости и низкой кавитационной износостойкости. Почти все ремонтные эпоксидные составы для заделки очагов кавитационного износа содержат металлический порошковый наполнитель, при этом целесообразность применения металлического порошкового наполнителя фирмами-изготовителями не обосновывается, а информация о влиянии порошкового наполнителя на кавитационную износостойкость эпоксидных составов недоступна для пользователей. Повышение долговечности эпоксидных составов в условиях кавитационного воздействия на основе решения вопроса о целесообразности применения в них порошкового наполнителя позволит существенно сэкономить расходы на топливо за счёт увеличения в эксплуатации продолжительности сохранения качества поверхности отремонтированных лопастей ГВ.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам кавитационного изнашивания посвящены труды отечественных — И. Н. Богачёва, И. Н. Воскресенского, Е. П. Георгиевской, Л. А. Гликмана, А. Я. Гринберга, Н. Н. Иванченко, В. Я. Карелина, С. П. Козырева, А. П. Пимошенко, Н. И. Пылаева, А. А. Скуридина, М. Г. Тимербулатова, В. В. Фомина, К. К. Шальнева и др. — и зарубежных — Б. Вайса, Р. Кнэппа, К. М. Прис, В. С. Плессета, А. Тирувенгадама, В. Г. Хэммита и многих др. — учёных. Заметный вклад в науку о кавитационном изнашивании внесли учёные ГУМРФ (прежде СПбГУВК, а ещё ранее ЛИВТ): О. К. Безюков, В. В. Быстрицкий, Ю. А. Гривнин, Е. О. Горбаченко, В. А. Жуков, С. П. Зубрилов; большое развитие наука о кавитационном изнашивании судостроительных материалов получила в трудах заслуженного деятеля науки РФ Л. И. Погодаева и Ю. Н. Цветкова. Тем не менее, несмотря на обилие научных публикаций в

области кавитационного изнашивания, в подавляющем большинстве из их числа затрагиваются вопросы кавитационного изнашивания металлов и их сплавов, вопросам же кавитационного изнашивания полимеров уделено неоправданно мало внимания. При этом остаются открытыми методические вопросы, связанные с испытаниями полимерных материалов на кавитационный износ с учётом способности большинства полимеров поглощать воду, а также вопросы выбора оптимального, с точки зрения кавитационной износостойкости, состава эпоксидных компаундов, в частности влияния дисперсных металлических наполнителей на механизм кавитационного разрушения композитов на основе эпоксидных компаундов.

Цель исследования – увеличение кавитационной износостойкости эпоксидного компаунда для ремонта лопастей гребных винтов, повреждённых при кавитации.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ характеристик кавитационного воздействия на поверхность лопастей ГВ с тем, чтобы знать особенности воздействия на ремонтный состав, нанесённый на повреждённый участок лопасти, в эксплуатации.

2. С учётом результатов, полученных при решении первой задачи, обосновать выбор экспериментальной установки для испытаний ремонтного состава на кавитационное изнашивание и разработать методику испытаний.

3. Исследовать механизм разрушения эпоксидных составов с металлическим порошковым наполнителем.

4. Разработать модель, описывающую влияние частиц наполнителя на кавитационную износостойкость ремонтного эпоксидного состава.

5. Провести сравнительный анализ кинетики кавитационного изнашивания эпоксидного компаунда с металлическим порошковым наполнителем и без него.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Впервые предложены и установлены характеристики кавитационного воздействия на лопасти ГВ – диаметр и скорость ударных струй и направление их удара по отношению к поверхности – по результатам анализа характерных зон очагов кавитационного износа на ГВ.

2. Подтверждено, на основе анализа реакции металлических материалов на кавитационное воздействие, что изнашивание материалов при испытании на ультразвуковых магнитострикционных вибраторах (МСВ) осуществляется при ударах микроструй.

3. Впервые описана кавитационная износостойкость композитов на основе эпоксидных смол в зависимости от характеристик дисперсного наполнителя из алюминиевой бронзы.

4. Доказана возможность использования метода профилометрии для определения продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания полимерных материалов.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

1. Расширены знания о природе кавитационного воздействия на лопасти ГВ и поверхность материалов при испытании на ультразвуковых МСВ, что позволит более обоснованно разрабатывать меры борьбы с его последствием и осуществлять выбор экспериментальных установок для проведения испытаний на кавитационное изнашивание.

2. Углублены представления о механизме кавитационного изнашивания эпоксидных компаундов с металлическим порошковым наполнителем и без него, что поможет скорректировать направления исследований по разработке новых ремонтных составов на основе эпоксидных смол.

Практическая значимость:

1. Предложен способ определения продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания полимеров, основанный на использовании метода профилометрии, позволяющий повысить точность и сократить продолжительность испытаний полимерных материалов на кавитационный износ.

2. Показано, что добавки металлических частиц в связующее из эпоксидной смолы снижают кавитационную износостойкость полученных полимерных композиций по сравнению с таким же эпоксидным компаундом, но без дисперсного металлического наполнителя.

Методология и методы исследования. Главные результаты работы получены на основе анализа характерных зон очагов кавитационного износа ГВ и лабораторных испытаний материалов на кавитационный износ с использованием ультразвукового магнитострикционного вибратора. Анализ зон кавитационного износа на лопастях ГВ осуществлялся с использованием метода профилометрии и основных положений теории распространения волн в жидкости. Результаты испытаний материалов на ультразвуковом МСВ анализировали с использованием методов оптической микроскопии, гравиметрии, профилометрии и микротвёрдости, а также основных положений теории пластичности. Обработку экспериментальных данных проводили с использованием законов стереометрической металлографии и традиционных методов математической статистики.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Кавитационное воздействие на лопасти ГВ осуществляется ударными струями, направленными под углом к поверхности лопасти, диаметр струй составляет несколько миллиметров, а скорость существенно превышает 400 м/с.

2. Перенос энергии от кавитационного облака к поверхности материала, испытываемого на ультразвуковом МСВ, осуществляется ударными микроструями.

3. Математическая модель, описывающая кавитационную износостойкость композитов на основе эпоксидных смол в зависимости от характеристик дисперсного наполнителя из алюминиевой бронзы.

4. Окончание инкубационного периода кавитационного изнашивания полимерных материалов определяется по точке нарушения плавности и (или) гладкости на зависимости высотного параметра шероховатости поверхности от продолжительности кавитационного воздействия.

5. Отказ от применения металлических порошковых наполнителей в эпоксидных компаундах позволяет принципиально изменить кинетику кавитационного изнашивания компаунда: на зависимости потерь массы компаунда от продолжительности кавитационного воздействия появляется инкубационный период.

Степень достоверности обусловлена применением известных апробированных методов испытаний на кавитационный износ, средств измерений профиля и износа поверхности, традиционных методов определения физических и механических свойств материалов, а также применением традиционных методов статистической обработки результатов эксперимента.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.5.19 Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства (технические науки), а именно: п. 15. Физико-химические процессы и условия нагружения, влияющие на работоспособность материалов и изделий; п. 18. Методы восстановления элементов и узлов судовых систем и устройств. Обеспечение необходимого уровня их надежности. Способы повышения долговечности систем и устройств.

Апробация результатов. Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: семинаре «Энерго- и ресурсосбережение на водном транспорте», посвящённом дню науки РФ (ГУМРФ) в 2021 и 2022 г.г.; X, XII, XIII и XIV межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» (ГУМРФ) в 2019, 2021, 2022 и 2023 г.г. соответственно; Национальной ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ГУМРФ в 2020, 2021 и 2022 г.г.; 65-й международной научной конференции Астраханского государственного технического университета в 2021 г.

Результаты работы:

1) Использовались в 2022–2023 г.г. при выполнении на кафедре технологии судоремонта ГУМРФ госбюджетной НИР ««Анализ износостойкости полимерных материалов для восстановления очагов кавитационного износа на лопастях гребных винтов»;

2) Реализованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» в ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»;

3) Рассмотрены в ЗАО «Канонерский судоремонтный завод» с положительным заключением о целесообразности их учёта при выборе эпоксидных составов для ремонта лопастей ГВ.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 18 работах, включая 4 статьи в журналах из перечня ВАК РФ и 6 статей в изданиях, индексируемых в международных базах (Scopus). По результатам исследований получен патент на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, состоящего из 138 наименований отечественных и зарубежных источников, и двух приложений. Общий объём диссертации – 166 страниц, включая текст, 67 рисунков, 8 таблиц и 4 страницы приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована её актуальность, приведены цель и задачи исследования и перечислены основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе выполнен аналитический обзор состояния проблемы, описаны характер и кинетика кавитационного изнашивания на примере металлических материалов деталей судового оборудования и ГВ, рассмотрены существующие технологии ремонта ГВ, проведен анализ полимерных ремонтных составов.

Кавитация ГВ носит нестационарный характер, обусловленный неравномерностью поля скоростей в диске винта. Основные причины неравномерности: для водоизмещающих судов – переменность аксиальной составляющей скорости попутного потока жидкости. По этой причине очаги кавитационного износа возникают на ГВ водоизмещающих судов в концевых сечениях лопастей (рисунок 1), что оказывает отрицательное влияние на КПД винта.

Рассмотрены регламентируемые Российским морским регистром судоходства и применяемые на судоремонтных предприятиях технологии восстановления изношенных лопастей ГВ: слесарно-механический, наплавка, нанесением полимерных составов.

Отмечена перспективность технологии восстановления очагов кавитационного износа на лопастях с применением полимерных составов, которую отличает оперативность и отсутствие нежелательных сопутствующих явлений, таких как нагрев зоны восстановления до высоких температур при наплавке, или последствий, таких как, уменьшение площади сечения

лопасти при слесарно-механическом способе. Наибольшее распространение получили составы на основе эпоксидных компаундов, отличающихся технологичностью и хорошей адгезией к металлу лопастей. Основным недостатком технологии восстановления очагов кавитационного износа с помощью эпоксидных компаундов связан с их низкой кавитационной износостойкостью. Рассмотрены причины низкой долговечности эпоксидных компаундов при кавитационном воздействии в условиях эксплуатации ГВ, указано на необоснованность широкого применения металлических порошковых наполнителей в эпоксидных ремонтных составах.

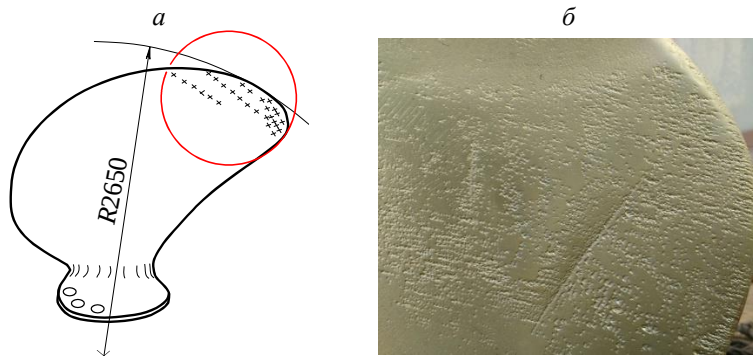


Рисунок 1 – Схема расположения очагов кавитационного износа (обведено красным) на лопастях ГВ теплохода «Atlantic runner» (а) и фото зоны износа (б)

В конце первой главы сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе проведена оценка характеристик ударного воздействия жидкости на поверхность лопастей ГВ водоизмещающих судов при кавитационном изнашивании — диаметра струй воды, скорости и направления их удара — по результатам анализа изношенной поверхности лопастей ГВ. Анализу подлежали две зоны в очагах кавитационного износа: зона наклёпа и периферийная зона, как наиболее информативные.

Визуальный осмотр периферийной зоны очагов износа, в которой располагаются отдельные вмятины, не перекрывающиеся друг с другом, проводили на четырёхлопастных ГВ разных диаметров из алюминиевых бронз четырёх теплоходов. Была отмечена одна и та же особенность, заключающаяся в направленности вмятин, образующихся на лопастях от кавитационных ударов (рисунок 2 а).

Форму вмятин исследовали с применением слепка изношенной поверхности лопасти ГВ из бронзы «Суняль» теплохода «Ангара». Провели измерения профиля трёх вмятин, сравнительно чётких и расположенных изолированно, щуповым методом. Все полученные профили вмятин (рисунок 2 б) оказались несимметричными, т. е. удар струй при схлопывании

кавитационной каверны происходил под некоторым углом α к поверхности лопасти.

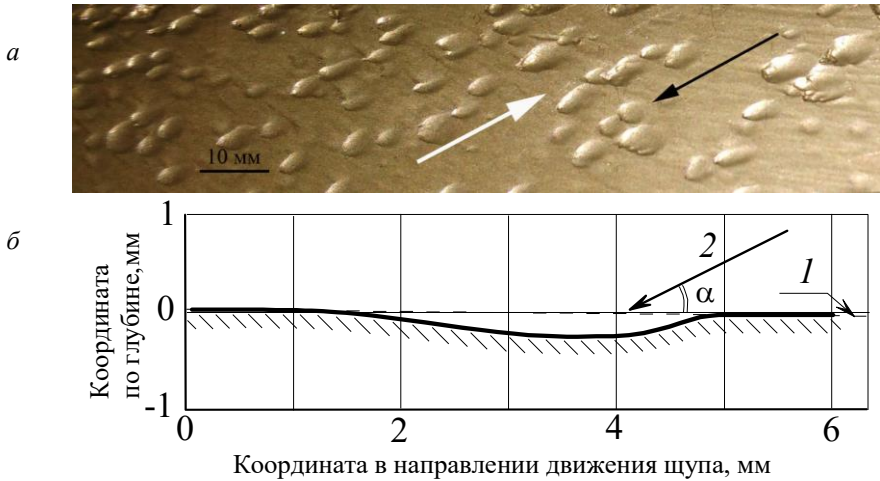


Рисунок 2 – Направленность вмятин на примере кавитационного повреждения на поверхности лопасти ГВ теплохода «Ариес» (*a*): черная стрелка – проекция вектора скорости движения лопасти; белая – скорости удара струй; и профиль вмятин на лопасти ГВ теплохода «Ангара» (*б*): 1 – исходная поверхность; 2 – примерное направление удара струи под углом α

Диаметр головной части струи оценили, измерив диаметр окружности, вписанной в сферический участок $D'C'$, сохранившийся на доньшке вмятины, как показано на рисунке 3 применительно к профилю на рисунке 2.

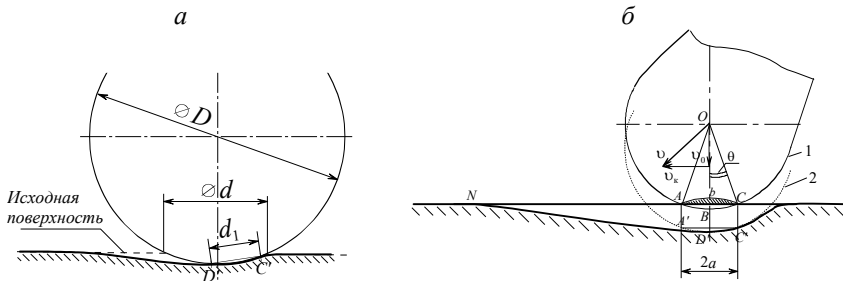


Рисунок 3 – К оценке диаметра головной части струи и деформации во вмятине (*a*), схема взаимодействия струи с поверхностью (*б*)

Головная часть струи в виде сферы 1 ударяет по поверхности со скоростью u . Внедрение струи в поверхность обусловлено вертикальной составляющей u_0 скорости; в момент удара по жидкости начинает распространяться ударная волна. К моменту, когда фронт AbC ударной волны обгонит границу AC расширяющейся контактной области, и начнётся растекание головной части, она уже внедрится на некоторую глубину в материал. Будем считать, что к моменту начала растекания головной части струи образовавшаяся вмятина ABC точно воспроизводит сферическую форму головной части струи. Для оценки диаметра AC пятна контакта, при достижении которого фронт ударной волны выходит на свободную поверхность головной части струи, проведём из точки C' горизонтальной отрезок до пересечения в т. A' с окружностью 2, вписанной в участок сферической поверхности $D'C'$ (рисунок 3 б). Волна давления распространится за пятно контакта и выходит на свободную поверхность капли в момент, когда

$$\sin \theta = u_0 / c, \quad (1)$$

где θ — угол с вершиной в центре капли, который опирается на радиус зоны контакта; u_0 — скорость удара струи; c — скорость звука в воде.

Аналогия между ударом капли и струи позволяет, пользуясь схемой рисунка 3 (б), записать:

$$\sin \theta = 2a / D, \quad (2)$$

где $2a$ — диаметр пятна контакта, равный отрезку $A'C'$ (рисунок 3 б); D — диаметр головной части струи, принятый равным диаметру окружности, вписанной в участок $D'C'$.

Подстановкой (2) в (1) находится скорость удара струи u_0 .

Интенсивность деформации ε на сферической части $D'C'$ вмятин оценивали по формуле Д. Тейбора:

$$\varepsilon = 0,2d / D, \quad (3)$$

где d — диаметр условного отпечатка, который образовался бы на поверхности в случае внедрения в материал на глубину кавитационной вмятины шарового индентора диаметром, равным диаметру D окружности, вписанной в доньшко вмятины (рисунок 3 а).

Полученные в результате анализа значения диаметров струй составили 2,5...5 мм, нормальной составляющей скорости удара — около 400 м/с, при этом деформация во вмятинах достигает 10 %.

Если принять, что угол $\alpha \approx 45^\circ$, тогда значение скорости удара u превысит 600 м/с. Косой удар струй приводит к тому, что при их растекании по поверхности скорость растекания превышает скорость удара кратно, в этих условиях большое значение будет иметь качество поверхности. А поэтому при разработке полимерного материала необходимо избегать дефектов на его поверхности (границ раздела фаз, пор, выходящих на поверхность и т. п.): любые микродефекты на поверхности, становятся очагами

разрушения. Полученные значения деформации указывают на то, что деформирование поверхности лопастей при кавитационных ударах происходит в глубокой пластической области.

Значение диаметра ударных струй, полученное по результатам анализа периферийной зоны, требует уточнения по результатам анализа зоны наклёпа. В зоне наклёпа имеет место многократное перекрытие кавитационных вмятин, но отделение материала ещё не началось, по этой зоне определили диаметр ударных струй и сопоставили полученное значение со значениями, полученными в результате анализа периферийной зоны. Анализ зависимостей деформации во вмятине от твёрдости сплава (рисунок 4 а), полученных при вдавливании шарикового индентора диаметром 1,588 мм на твердомере Роквелла в поверхность 33 сплавов разной твёрдости, и таких же зависимостей, полученных в результате обработки данных Н. И. Пылаева и Ю. У. Эделя по вмятинам, образованным при гидродинамической кавитации (в диффузоре) на сплавах разной твёрдости, показал, что во всех случаях имеет место соотношение степенного вида (рисунок 4 а):

$$\varepsilon = \text{const}/HV^n,$$

где const — опытная постоянная; n — показатель степени; HV — твёрдость по Виккерсу.

А значит, зону наклёпа в очаге кавитационного износа на лопастях ГВ можно смоделировать в лаборатории вдавливанием шарикового индентора в образец материала, из которого изготавливаются лопасти ГВ.

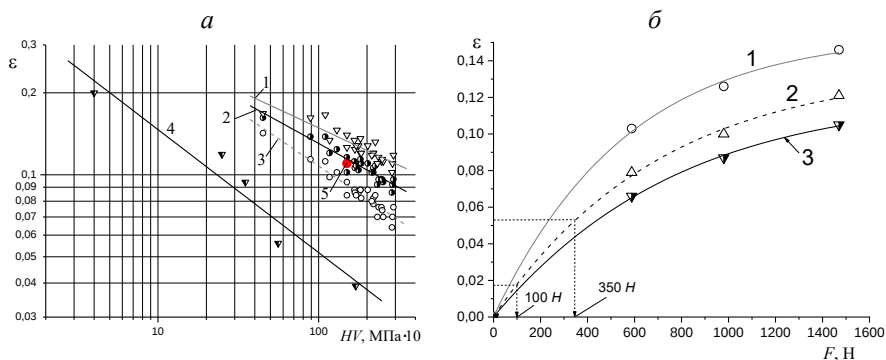


Рисунок 4 – Зависимость деформации в отпечатках, полученных при вдавливании шарика диаметром 1,588 мм на твердомере Роквелла при нагрузке 1470 Н (1), 980 Н (2), 588 Н (3) и при схлопывании кавитационных каверн в диффузоре (4), от твёрдости сплава (а) и от нагрузки (б) на шариковый индентор диаметром 1,588 мм при вдавливании его в сплавы твёрдостью по Виккерсу 1000 (1), 2000 (2) и 3000 МПа (3); 5 – точка, соответствующая вмятинам на ГВ

Моделирование проводили на пластинах с размерами 100×50×20 мм (рисунок 5) из бронзы БрАЖНМц9-4-4-1 — деформируемом аналоге литейной бронзы БрА9Ж4Н4Л, используемой для изготовления ГВ. В эту грань вдавливали шариковые инденторы разного диаметра: 1,588; 2,5; 3,175 и 5,0 мм, при этом соблюдали условие одинаковой степени деформации в отпечатках разного диаметра. Необходимое для вдавливания индентора конкретного диаметра усилие определяли по калибровочным зависимостям деформации в отпечатке от усилия вдавливания (рисунок 4 б); эти зависимости получили перестроением графиков на рисунке 4 а. Потребное усилие для шарика диаметром 1,588 мм определяли для двух значений деформаций 0,018 и 0,052 (рисунок 4 б), что близко к значениям, получаемым на ГВ, и обеспечивает усилие в пределах функциональных возможностей твердомеров Роквелла и Бринелля. При этом пользовались зависимостью 2, соответствующей по твёрдости бронзе БрАЖНМц9-4-4-1.

Каждый индентор вдавливали многократно в пределах небольшой квадратной площади S , отмеченной на поверхности пластины (рисунок 5 а) таким образом, чтобы отпечатки многократно перекрывались, тем самым имитируя зону наклёпа в очаге кавитационного износа. Значения площадей S при переходе к индентору другого диаметра рассчитывали по формуле:

$$S_2 = S_1(D_2/D_1)^2,$$

где S_1 и S_2 — значения площадей, в пределах которых происходило вдавливание инденторов диаметрами D_1 и D_2 соответственно.

Аналогичным образом пересчитывали и значения потребных усилий на индентор (таблица).

Таблица — Значения нагрузки на шарики разного диаметра при вдавливании их в бронзу БрАЖНМц9-4-4-1 и размеры площадей, в пределах которых осуществляли вдавливание

$D_{ш}, \text{мм}$	Деформация в отпечатке $\varepsilon = 0,052$			Деформация в отпечатке $\varepsilon = 0,018$		
	$F, \text{Н}$	$S, \text{мм} \times \text{мм}$	количество отпечатков	$F, \text{Н}$	$S, \text{мм} \times \text{мм}$	количество отпечатков
1,588	350	5,0×5,0	300	100	10,0×10,0	1000
2,5	867	7,9×7,9		248	15,7×15,7	
3,175	1399	10,0×10,0		400	20,0×20,0	
5,0	3470	15,7×15,7		993	31,5×31,5	

Измерения значения среднего арифметического отклонения профиля R_a в пределах каждой площади позволили получить зависимости параметра R_a от диаметра $D_{ш}$ индентора (рисунок 5 б).

Как видно, графики $R_a(D_{ш})$ оказались линейными:

$$R_a = kD_{ш}. \quad (4)$$

где R_a — среднее арифметическое отклонение профиля (мкм); k — коэффициент пропорциональности, причём как показал дальнейший анализ, существует полиномиальную зависимость $k(\varepsilon)$: следующего вида

$$k = 67\varepsilon + 979\varepsilon^2.$$

Значение контролируемой деформации взяли соответствующей среднему значению интенсивности деформаций во вмятинах на лопастях ГВ теплохода «Ангара» (см. точку 5 на рисунке 4 *а*), и для ГВ выражение (4) приняло вид:

$$R_a = 14D. \quad (5)$$

В формуле (5) переменная D в отличие от выражения (4) обозначает диаметр (мм) головной части струи, ударяющей по поверхности лопасти при кавитационном воздействии.

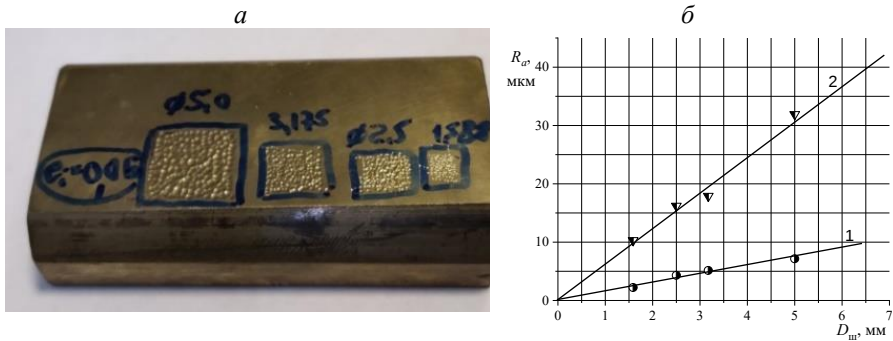


Рисунок 5 – Общий вид плитки (*а*) из алюминиевой бронзы с участками вдавливания шариков разного диаметра и зависимость параметра R_a поверхности бронзы, сформированной при многократном вдавливании в неё шарикового индентора, от диаметра индентора (*б*) при обеспечении деформации в отпечатке равной 0,018 (1) и 0,052 (2)

Подстановкой в выражение (5) значения R_a , соответствующего окончанию инкубационного периода изнашивания лопастей ГВ судна «Профессор Логачёв» получили, что диаметр головной части струй, воздействующих на поверхность лопастей при схлопывании кавитационных каверн, $D \approx 10$ мм. Полученный результат не противоречит оценочным значениям диаметров струй, полученным по результатам анализа периферийной зоны.

В третьей главе проведен анализ оборудования для испытаний на кавитационный износ. В настоящее время самым распространённым типом экспериментальной установки являются ультразвуковые МСВ, обладающие рядом существенных преимуществ перед остальными стендами. Однако до сих пор открытым остаётся вопрос о механизме передачи энергии от кавитационного облака к поверхности материала, испытываемого на МСВ: с помощью ударных струй или волн. Для обоснования правомерности проведения испытаний материалов, используемых для изготовления и ремонта ГВ, на ультразвуковых МСВ, необходимо исследовать механизм

кавитационного воздействия на поверхность металла при испытании на МСВ.

Проведённые исследования основывались на анализе реакции металлического материала на кавитационное воздействие на МСВ с применением метода микротвёрдости.

Для испытаний были выбраны три деформируемых сплава в отожжённом состоянии с преимущественно однофазной структурой: техническая медь МЗ, латунь Л60, алюминиевый сплав АМг5.

В рамках предварительных опытов определяли истинное удлинение сплавов при одноосном растяжении. Испытания на одноосное растяжение проводили на цилиндрических образцах, изготовленных по рекомендациям ГОСТ 1497-84, с отношением рабочей длины к диаметру, равным пяти. По результатам опытов определяли диаметр $d_{ш}$ шейки и радиус R контура шейки (рисунок 6) и рассчитывали относительное сужение при разрыве.

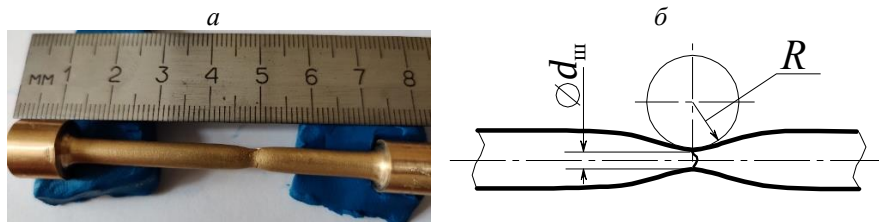


Рисунок 6 – Подготовка к измерению (а) и схема измерений (б) шейки разорванного образца

Основные испытания состояли из двух серий опытов. В первой серии определяли упрочнение сплавов в условиях кавитационного изнашивания. Испытания на кавитационное изнашивание проводили на ультразвуковом МСВ в мягкой пресной воде при частоте и амплитуде колебаний торца концентратора МСВ равными соответственно около 22 кГц и 28 мкм. По результатам испытаний строили зависимости потерь массы и микротвёрдости от продолжительности кавитационного воздействия (рисунок 7 а) и определяли максимальное значение микротвёрдости сплава, достижимое в течение инкубационного периода (рисунок 7 а).

Во второй серии опытов исследовали упрочнение сплавов при статическом нагружении в условиях одноосного сжатия цилиндрических образцов. После сжатия образцы разрезали или вдоль оси образца, или по меридиональному сечению. Полученную поверхность шлифовали и полировали. Измерения микротвёрдости проводили в центре сечений. По результатам измерений строили зависимость микротвёрдости от интенсивности деформации (рисунок 7 б).

Так как зависимость твёрдости от интенсивности деформаций считается единой независимо от схемы напряжённого состояния, то по значению

максимальной микротвёрдости (рисунок 7 а) с графика $H_{\mu}(e_i)$ «снимали» критическое значение деформации $e_{кр}$, т.е. значение, соответствующее началу разрушения материала при кавитационном воздействии.

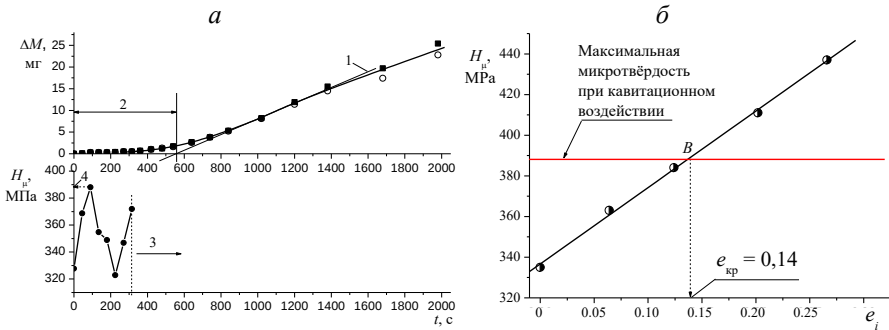


Рисунок 7 – Кинетика изменения потерь массы (вверху) и упрочнения поверхности (внизу) при кавитационном изнашивании технической меди (а) и зависимость микротвёрдости меди от интенсивности деформации при одноосном сжатии (б):

■ – первый образец; ○ – второй образец; 1 – касательная; 2 – условный инкубационный период; 3 – зона развитого рельефа (чёткие отпечатки не получаются); 4 – максимальная микротвёрдость поверхности при кавитационном воздействии

Обработка данных Г. А. Смирнова-Аляева и В. Л. Колмогорова позволила получить для испытанных сплавов зависимости критической степени деформации $e_{кр}$ от коэффициента жёсткости схемы напряжённого состояния Π , предложенного Г. А. Смирновым-Аляевым в форме:

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения, σ_i — интенсивность напряжений.

Неизвестные постоянные в полученных зависимостях $e_{кр}(\Pi)$ определяли по результатам обмера шейки образцов после одноосного растяжения (рисунок 6 б). По радиусу контура шейки и её диаметру, основываясь на работах Н.Н. Давиденкова и Н. И. Спиридоновой, вычисляли коэффициент Π :

$$\Pi = 1 + \frac{3 d_{ш}}{4 R}.$$

Подстановка найденных значений $e_{кр}$ и Π для области шейки разорванных образцов позволила вычислить неизвестные коэффициенты в зависимостях $e_{кр}(\Pi)$ и получить для меди, латуни Л60 и сплава АМг5 соответственно зависимости следующего вида:

$$\begin{aligned}e_{кр} &= 2,55(1 - 0,1 \Pi), \\e_{кр} &= 4,45\exp(-0,95\Pi), \\e_{кр} &= 1,98\exp(-0,286\Pi).\end{aligned}$$

По полученным соотношениям рассчитали значения коэффициента жёсткости схемы напряжённого состояния, реализуемой на поверхности при кавитационном воздействии: для меди $\Pi \approx 9,5$; для латуни $\Pi \approx 2,0$; для алюминиевого сплава $\Pi \approx 11$.

Полученные значения коэффициентов Π указывает на то, что на поверхности сплавов при кавитационном воздействии на ультразвуковом МСВ возникает очень жёсткое напряжённое состояние, более жёсткое, чем при одноосном растяжении. Такие значения коэффициента Π объяснимы, если принять, что основной механизм воздействия — удары микроструй. При схлопывании кавитационных пузырьков удары происходят с очень высокими скоростями, и при одновременном ударе нескольких струй в соседние участки поверхности образуются несколько близко расположенных вмятин, а металл между ними выжимается с большой скоростью вверх. Образуется валик, и очевидно, что, в первую очередь, трещины образуются у вершины гребня, так как именно у вершины в поверхностных слоях возникают растягивающие напряжения. И чем выше гребень, и меньше радиус его скругления, тем больше доля растягивающих напряжений в материале, примыкающем к вершине гребней. Образование частиц износа происходит, по всей видимости, в результате передоформирования материала гребней.

Если бы основным механизмом передачи энергии к поверхности были ударные волны от кооперативного схлопывания пузырьков в кавитационном облаке, то тогда бы было зарегистрировано значительно более высокое упрочнение поверхности, так как механическое воздействие на поверхность происходило бы с частотой ультразвуковых колебаний концентратора МСВ, т. е. около 22 кГц. Использование в этом случае зависимости $H_p(e_i)$, полученной по результатам пластического деформирования образцов в условиях статического нагружения, для оценки деформации при кавитационном воздействии, показало бы существенно более высокие значения критической степени деформации.

При передаче энергии от кавитационного облака к поверхности ударными струями маловероятно попадание микроструй на один и тот же микрорасток поверхности, а значит, и частота нагружения конкретного микрообъёма поверхности будет существенно ниже частоты колебания концентратора МСВ, и эффект влияния ультразвуковой частоты на упрочнение металла пропадает.

В четвертой главе проведен анализ кавитационного изнашивания металлических сплавов и полимерных составов с дисперсным металлическим наполнителем. Были испытаны две винтовые бронзы: БрА9Ж4Н4Л и БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л, а также несколько композитов на основе эпоксидно-

го компаунда с добавкой дисперсного металлического наполнителя: Devcon Bronze Putty, Devcon Titanium Putty и эпоксидный компаунд К-153 с добавкой частиц бронзы. В качестве отвердителя для эпоксидного компаунда использовался полиэтиленполиамин.

Анализ показал, что изнашивание металлических материалов сопровождается выраженным инкубационным периодом, тогда как у полимерных композитов с порошковым наполнителем отделение частиц с поверхности начинается с первых секунд кавитационного воздействия (рисунок 8).

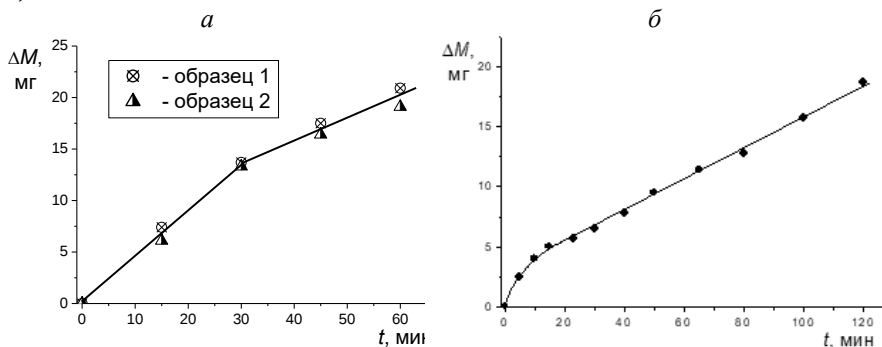


Рисунок 8 – Кинетические кривые изнашивания полимерных составов Devcon Titanium Putty (а) и эпоксидного компаунда К-153 с бронзовым порошковым наполнителем (б)

Исследование механизма кавитационного разрушения показало, что добавка металлического дисперсного наполнителя в эпоксидный компаунд снижает кавитационную износостойкость материала, так как граница раздела *металл – полимер* играет роль очагов разрушения, и изнашивание таких композитов происходит без инкубационного периода. Сначала происходит разрушение полимера, примыкающего к границам частиц, затем – выламывание частиц бронзы из эпоксидной матрицы и последующая разбивка краёв образующихся пор (рисунок 9).

По результатам испытания 24 составов получена модель, описывающая потери массы эпоксидного компаунда от характеристик порошка Al-бронзы:

$$\Delta M = 6,698 - 1,008h_{\text{cp}} + 343,4V_{\text{отн}} - 2499S_{\text{уд}} - 25,88h_{\text{cp}}V_{\text{отн}} + 192,4h_{\text{cp}}S_{\text{уд}} - 48892V_{\text{отн}}S_{\text{уд}} + 2132h_{\text{cp}}V_{\text{отн}}S_{\text{уд}} + 0,0326h_{\text{cp}}^2 - 4385V_{\text{отн}}^2 + 140247S_{\text{уд}}^2,$$

где ΔM — кавитационный износ (мг); h_{cp} — средняя длина хорды сечения частиц (мкм); $V_{\text{отн}}$ — относительная объёмная доля металлического наполнителя в композиции ($\text{мм}^3/\text{мм}^3$); $S_{\text{уд}}$ — суммарная площадь поверхности микрочастиц бронзы в единице объёма композиции ($\text{мм}^2/\text{мм}^3$).

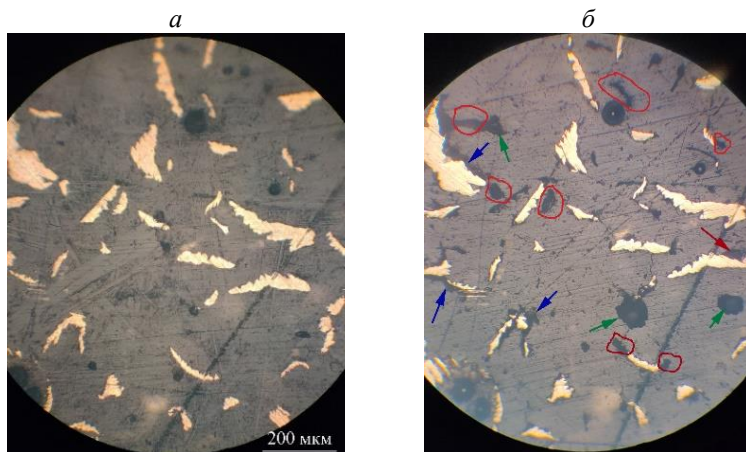


Рисунок 9 — Образец из компаунда К-153 с добавкой частиц бронзы (объёмная доля частиц — 9,5 %) до (а) и после (б) кавитационного воздействия в течение 5 мин: обводка красным цветом – места отделения частиц бронзы; стрелки зелёного цвета — разбивка краёв пор; стрелки синего цвета — разрушение полимера, примыкающего к границам частиц

В пятой главе проведён анализ кинетики кавитационного изнашивания и механизма кавитационного разрушения эпоксидного компаунда без металлического порошкового наполнителя.

Продолжительность инкубационного периода можно считать основным показателем кавитационной износостойкости материалов ГВ. Предложен способ определения инкубационного периода кавитационного изнашивания полимеров, основанный на применении метода профилометрии. Окончание инкубационного периода кавитационного изнашивания, согласно предложенному способу, определяется по точке нарушения плавности и (или) гладкости на зависимости высотного параметра шероховатости поверхности R_a от продолжительности кавитационного воздействия.

Установлено, что изнашивание эпоксидного компаунда без порошкового наполнителя в отличие от составов, содержащих металлический порошок, происходит с выраженным инкубационным периодом (рисунок 10 а).

Анализ зависимости инкубационного периода кавитационного изнашивания полимеров от их твёрдости (рисунок 10 б) показал, что кавитационное разрушение эпоксидного компаунда К-153 происходит хрупко. Адгезия же эпоксидного компаунда к алюминиевой бронзе более, чем в 30 раз ниже прочности самого компаунда, а поэтому добавка металлического порошка в эпоксидную смолу только ухудшит кавитационную износостойкость полимера.

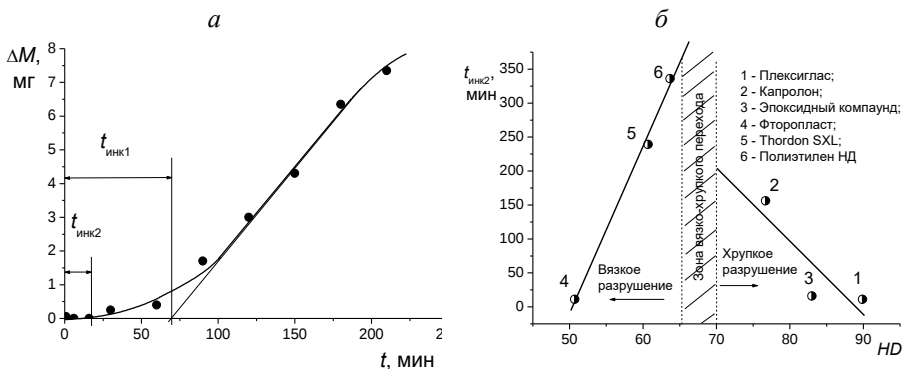


Рисунок 10 – Кинетическая кривая изнашивания эпоксидного компаунда К-153 без порошкового наполнителя (а) и зависимость продолжительности инкубационного периода изнашивания полимеров от их твёрдости (б)

При отказе от применения в эпоксидных составах металлических порошковых наполнителей кавитационное изнашивание эпоксидного ремонтного состава протекает с инкубационным периодом. В течение инкубационного периода качество поверхности отремонтированных участков лопастей не ухудшается, а значит и КПД двигателя не снижается, что приводит к уменьшению перерасхода топлива. Ожидаемый экономический эффект в зависимости от мощности главных двигателей и характера кавитационных повреждений на лопастях ГВ варьируется в широких пределах, и составляет от 80 до 250 руб. на каждый кВт мощности судового дизеля за один междоковый период.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Кавитационное разрушение поверхностей лопастей происходит в результате ударов струй, образующихся при схлопывании кавитационных каверн, диаметр струй составляет несколько миллиметров, а скорость значительно превышает 400 м/с, при этом удар направлен под углом к поверхности лопастей. Косой удар предполагает, что кавитационная износостойкость отремонтированной поверхности лопастей зависит от наличия на поверхности дефектов, включая границы раздела между эпоксидной матрицей и частицами наполнителя.
2. Основным механизмом переноса энергии от кавитационного облака к поверхности материала, испытываемого на ультразвуковых МСВ, является струеударный, что позволяет применять их для проведения испытания на кавитационную износостойкость материалов ГВ.
3. Разрушение композита на основе эпоксидного компаунда, содержащего дисперсный наполнитель из металлических частиц, начинается с участков

полимера, примыкающих к границам металлических частиц. Предложена модель кавитационной износостойкости эпоксидных композитов с дисперсным наполнителем в виде частиц бронзы при испытании на ультразвуковом МСВ, позволяющая определить износостойкость в зависимости от размера частиц, их объёмной доли в композите и удельной площади поверхности частиц. Предпочтение следует отдавать ненаполненным эпоксидным компаундам.

4. Предложен способ определения инкубационного периода полимеров при кавитационном изнашивании, основанный на измерении шероховатости поверхности в процессе кавитационного воздействия, согласно которому окончание инкубационного периода кавитационного изнашивания полимерных материалов определяется по точке нарушения плавности и (или) гладкости на зависимости высотного параметра шероховатости поверхности от продолжительности кавитационного воздействия. Предложенный способ позволяет избежать грубых ошибок в оценке продолжительности инкубационного периода и снизить трудоёмкость испытаний на кавитационное изнашивание полимерных материалов, отличающихся заметным водопоглощением, включая эпоксидные составы.

5. Отказ от введения металлических порошковых наполнителей в эпоксидные компаунды, предназначенные для заделки очагов кавитационного износа на лопастях ГВ, позволяет принципиально изменить кинетику кавитационного изнашивания эпоксидного компаунда: на зависимости потерь массы эпоксидного компаунда от продолжительности кавитационного воздействия появляется инкубационный период, что позволяет уменьшить перерасход топлива из-за снижения качества отремонтированной поверхности лопастей при кавитационном воздействии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Цветков, Ю. Н. Оценка диаметра струй воды, воздействующих на поверхность лопастей гребных винтов при кавитационном изнашивании / Ю. Н. Цветков, **Я. О. Фиактистов**, Е. О. Горбаченко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — №1. — С. 54–64.

2. Фиактистов, Я. О. Механизм воздействия на поверхность материалов при изнашивании в условиях ультразвуковой кавитации / **Я. О. Фиактистов**, Ю. Н. Цветков // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 70. — С. 48–63.

3. Фиактистов, Я. О. Механизм разрушения эпоксидных композитов с металлическим порошковым наполнителем при кавитационном воздействии / **Я. О. Фиактистов**, Ю. Н. Цветков, Н. С. Зайцева // Вестник Госу-

дарственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — №1. — С. 64–72.

4. Цветков, Ю. Н. Влияние добавки бронзового порошка на адгезию эпоксидного компаунда к алюминиевой бронзе / Ю. Н. Цветков, Н. М. Вихров, **Я. О. Фиактистов** // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — №2. — С. 28–289.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах:

5. Tsvetkov, Y. N. Hardening peculiarities of metallic materials during wear under ultrasonic cavitation / Y. N. Tsvetkov, E. O. Gorbachenko, **Ya. O. Fiaktistov** // Advances in Intelligent Systems and Computing. — 2021. — № 1258 AISC. — P. 409–420. — doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_35.

6. Tsvetkov, Y. N. Analysis of the Geometry of Dents on a Propeller Blade Surface during Cavitation Wear / Y. N. Tsvetkov, E. O. Gorbachenko, **Ya. O. Fiaktistov** // Journal of Friction and Wear. — 2021. — Vol. 42. — № 1. — P. 17–22. — doi: 10.32864/0202-4977-2021-42-1-33-41.

7. Fiaktistov, Y. Model of the cavitation wear resistance of metal powder filled epoxy composites / **Y. Fiaktistov**, Y. Tsvetkov, N. Zaytseva // E3S Web of Conferences «XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry «State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2022»». — 2022. — Vol. 363. — art. no. 01035. — doi.org/10.1051/e3sconf/202236301035.

8. Tsvetkov, Y. N. Comparative Analysis of Cavitation Wear of Titanium Alloy in Fresh and Sea Water / Y. N. Tsvetkov, **Ya. O. Fiaktistov**, Ye. R. Kudryavzeva // Journal of Friction and Wear. — 2022. — Vol. 43. — № 1. — P. 20–26. — doi: 10.3103/S1068366622010123.

9. Tsvetkov, Y. N. Evaluation of the incubation period of polymers in cavitation wear by the method of profilometry / Y. N. Tsvetkov, **Ya. O. Fiaktistov** // Industrial Laboratory. Materials Diagnostics. — 2023. — Vol. 89. — Is. 5. — P. 64–70. — https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-5-64-70.

10. Fiaktistov, Y. O. Problems in using the microhardness method to assess the ultimate deformation of the surface of cast alloys during wear / **Y. O. Fiaktistov**, Y. N. Tsvetkov, E. R. Kudryavtseva, et al. // AIP Conference Proceedings. — 2024. — Vol. 3021. — art. no. 030034. — https://doi.org/10.1063/5.0193770.

Патент на изобретение:

11. Патент № 2797774 Российская Федерация, МПК G01N3/32 (2006.01) G01N3/56 (2006.01). Способ определения продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания полимерных материалов / Цветков Ю. Н., **Фиактистов Я. О.**; Заявитель ГУМРФ. — 10 с.

Публикации в других изданиях:

12. Фиактистов, Я. О. Ремонт гребных винтов, изношенных при кавитации, с применением полимерных составов / **Я. О. Фиактистов** // Мате-

риалы 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.

13. Фиактистов, Я. О. Конструкция образцов для испытаний полимерных составов на кавитационную износостойкость / **Я. О. Фиактистов** Е. О. Горбаченко // Сборник тезисов докладов национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2020. — С. 112–114.

14. Фиактистов, Я. О. Кавитационная износостойкость полимерных составов для ремонта гребных винтов / **Я. О. Фиактистов** // Материалы XII межвузовской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России». 20 мая 2021 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2021. — Часть 1. — С.191–195.

15. Фиактистов, Я. О. Кавитационная износостойкость полимерных составов с металлическим наполнителем / **Я. О. Фиактистов**, Ю. Н. Цветков // 65-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета. — Астрахань: Изд-во АГТУ, 2021. — С. 857–862. Режим доступа: <http://astu.org/Content/Page/5833>.

16. Фиактистов, Я. О. Особенность определения кавитационной износостойкости полимерных составов на ультразвуковых магнитострикционных вибраторах / **Я. О. Фиактистов** // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». Том 2. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2022. — С. 249-255.

17. Фиактистов, Я. О. Структура полимерных композитов с металлическим порошковым наполнителем для восстановления очагов кавитационного износа / **Я. О. Фиактистов**, Ю. Н. Цветков, Н. С. Зайцева // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова». Том 2. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2022. — С. 183-191.

18. Зайцева, Н. С. Анализ прочности ремонтных составов на основе эпоксидного компаунда в условиях работы лопастей гребных винтов/ Н. С. Зайцева, **Я. О. Фиактистов** // Материалы межвузовской научно-практической конференции для аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 18 мая 2023 года: Часть 1. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2023. — С. 186-191.