

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-946-963

MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR REBUILDING SHIP PROPELLERS BLADES DAMAGED UNDER CAVITATION ATTACK: HISTORY AND CURRENT STATE

Y. N. Tsvetkov, S. G. Baranov, Ya. O. Fiaktistov

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

Materials used for manufacturing ship propellers were listed, and classification of technologies of repairing ship propellers with cavitation wear spots was cited. The characteristics of materials used in the technologies were given. The advantages and disadvantages of the repair through deposition by welding as main technology at present time were listed. Alloys most resistant to cavitation wear were considered: dispersion-hardening alloys and alloys, in which the phase transformation occurs in cavitation impacts. The low manufacturability of mentioned alloys was pointed to, that is the principal cause of the fact that these alloys did not have a wide distribution in ship propellers repair. In modern practice of deposition by welding, the filler materials close by composition to the propeller alloys are used, and priority is given to regular recovery of surface quality and not to the rise in the surface wear-resistance. Improvement of the welding technology is now directed at the development of technological methods to raise the wear resistance, that is the methods, not based on the using the filler materials different from ship propellers materials. The advantage of the use of polymeric materials to repair the cavitation wear spots on the blades is noted. All the repair compounds are made of thermosetting resins, the most widespread of which are epoxy compounds. The peculiarities of cavitation attack on the blade surface in service are analyzed. It was mentioned that polymeric compounds being used nowadays are developed without taking into account these peculiarities. One has to draw attention to that the longevity of polymeric compound under propeller cavitation is determined in many respects by the adhesion of polymer to propeller material. A solution for the problem of the low adhesion of the polymer compounds to the propellers alloys will displace the repair technology based on the deposition by welding in future.

Key words: ship propellers blade, cavitation wear, incubation period, cavitation wear spot, repair, spraying, deposition by welding, polymeric repair composition, wear-resistance, manufacturability, adhesion.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., S. G. Baranov and Ya. O. Fiaktistov "Materials and technologies for rebuilding ship propellers blades damaged under cavitation attack: history and current state." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 946–963. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-946-963.

УДК 629.12.037.1

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗНОШЕННЫХ ПРИ КАВИТАЦИИ ЛОПАСТЕЙ ГРЕБНЫХ ВИНТОВ: ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Ю. Н. Цветков, С. Г. Баранов, Я. О. Фиактистов

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

Выполнен обзор материалов, используемых для изготовления гребных винтов и приведена классификация технологий ремонта винтов с очагами кавитационного износа. Дана характеристика применяемых

в этих технологиях материалов. Указаны достоинства и недостатки наплавки как основной в настоящее время технологии ремонта. Рассмотрены сплавы, наиболее износостойкие в условиях кавитации: дисперсионно-твердеющие сплавы и сплавы, испытывающие фазовые превращения при ударном нагружении. Отмечается, что ввиду низкой технологичности указанные сплавы не получили распространение в судоремонте, в современной практике ремонта изношенных при кавитации винтов используют материалы, близкие по составу к материалу судового движителя, фокусируя внимание на регулярном восстановлении качества поверхности, а не повышении ее износостойкости. Совершенствование технологии наплавки направлено в настоящее время на развитие технологических методов повышения износостойкости, т. е. методов, не предполагающих применение для повышения кавитационной износостойкости присадочных материалов, отличных от материала, используемого для изготовления гребных винтов. Отмечается перспективность использования полимерных составов для ремонта очагов кавитационного износа на лопастях. Обращается внимание на то, что все ремонтные составы изготавливаются на основе термореактивных смол, из которых наибольшее распространение получили эпоксидные компаунды. Указаны особенности кавитационного воздействия на поверхность лопастей в эксплуатации. Подчеркивается, что используемые в настоящее время полимерные составы и технологии разрабатываются без учета этих особенностей. Акцентируется внимание на том, что долговечность полимерного состава в условиях кавитации гребного винта определяется во многом адгезией полимера к материалу винта. Сделан вывод о том, что решение проблемы низкой адгезии полимерных ремонтных составов к материалу ГВ позволит в будущем вытеснить технологию ремонта ГВ, основанную на наплавке.

Ключевые слова: лопасть гребного винта, кавитационное изнашивание, инкубационный период, очаг кавитационного износа, ремонт, напыление, наплавка, полимерный ремонтный состав, износостойкость, технологичность, адгезия.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Материалы и технологии для восстановления изношенных при кавитации лопастей гребных винтов: история и современное состояние / Ю. Н. Цветков, С. Г. Баранов, Я. О. Фиактистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 946–963. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-946-963.

Введение (Introduction)

Гребной винт (ГВ) относится к одним из наиболее дорогостоящих и ответственных изделий в составе судовой энергетической установки. От состояния ГВ зависит не только безопасность плавания, но и эффективность эксплуатации СЭУ. В процессе эксплуатации ГВ он подвергается коррозионному и кавитационному воздействию, что отражается на качестве поверхности его лопастей и, как следствие, на КПД судового движителя. Поэтому на состояние поверхности лопастей ГВ обращают серьезное внимание как в процессе эксплуатации¹, так и в результате проведения технологических операций при их изготовлении [1].

Кавитационное изнашивание ГВ — распространенное явление на водном транспорте. На современных судах ГВ изготавливают из сплавов, отличающихся сравнительно высокой коррозионной стойкостью, поэтому очаги кавитационного износа на лопастях имеют локальный характер и очень грубую рваную поверхность в отличие от коррозионно-нестойких углеродистых сталей и чугунов, широко применявшихся до середины XX в. для литья ГВ морских судов. На движителях из углеродистых сталей и чугунов кавитационное разрушение имело характер коррозионно-кавитационного с выраженным увеличением износа лопасти в направлении от оси вращения к концу лопасти.

Кавитационный износ обнаруживается на ГВ практически всех быстроходных судов, в частности судов на подводных крыльях. Как правило, на ГВ этих судов износ возникает в корневых районах лопастей, что снижает прочность лопасти и повышает вероятность аварийной ситуации из-за ее обрыва. На движителях больших транспортных судов от кавитационного износа страдают главным образом концевые районы лопастей, — в этом случае снижается КПД движителя.

Особенностью кавитационного изнашивания металлических [2] и полимерных [3] материалов является наличие инкубационного периода, в течение которого потери материала с поверхности практически отсутствуют, а значит, нет существенного ухудшения качества поверхности.

¹ Кацман Ф. М. Эксплуатация пропульсивного комплекса морского судна. М.: Транспорт, 1987. 223 с.

Поэтому оценивать кавитационную износостойкость материалов ГВ важно именно по продолжительности инкубационного периода, а не по скорости потери массы (объема) материала с поверхности. В связи с этим ГВ сразу подлежит ремонту, заключающемуся в восстановлении качества поверхности при обнаружении кавитационного износа в процессе очередного докования судна.

Цель работы — на основе аналитического обзора материалов и технологий, применяемых для ремонта лопастей ГВ, изношенных при кавитации, определить перспективные направления совершенствования ремонта ГВ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Материалы, применяемые для изготовления гребных винтов. В подавляющем большинстве случаев ГВ современных судов изготавливают из металлических сплавов. Несмотря на все большее распространение полимерных материалов в технике, включая судостроение, использование их для изготовления ГВ даже с учетом технологичности полимеров пока находится под вопросом. Очевидно, что применение термопластичных полимеров для изготовления крупных ГВ (для морских транспортных судов) нецелесообразно по причине их малой жесткости и склонности к ползучести, а применение в качестве материала ГВ термореактивных полимеров невозможно по причине их склонности к хрупкому разрушению. Перспективным для производства крупных ГВ является применение композитных материалов, однако в направлении их создания для ГВ необходимо провести большой объем исследований по выбору оптимального сочетания связующего и наполнителя. Например, опыты на кавитационную износостойкость композита, состоящего из эпоксидной матрицы и упрочняющих волокон (углеродных, стеклянных или арамидных) [4], показали, что кавитационное изнашивание композита происходит путем шелушения эпоксидного связующего, при этом обнажаются волокна наполнителя, и повреждение распространяется в глубь материала.

Отраслевой стандарт ОСТ 5.9437–84 «Винты гребные металлические. Марки и назначение материалов» рекомендует для литья металлических ГВ применять следующие материалы: медные сплавы: латунь ЛЦ40МцЗЖ; бронзы: БрА9Ж4Н4Л, БрА7Мц14ЖЗН2Л; углеродистую сталь 25Л; нержавеющие стали: 08Х14НДЛ; 08Х15Н4ДМЛ.

До середины XX в. наиболее распространенными материалами для литья ГВ были чугуны, углеродистые стали и латуни. Чугуны уже более полувека не применяются в качестве материала ГВ, а применение углеродистой стали запрещено для изготовления движителей морских судов. Латунь для литья ГВ, ввиду ее более высокого удельного веса и низкой коррозионной стойкости в морской воде, в настоящее время практически не применяется, ее вытеснили алюминиевые бронзы. В XXI в. алюминиевые бронзы являются основным материалом для производства ГВ морских транспортных судов, реже используется нержавеющая сталь (для некоторых типов судов: ледоколов, лесовозов и т. п.).

Для изготовления движителей судов внутреннего плавания применяются углеродистая сталь 25Л и нержавеющая сталь 08Х14НДЛ. Применение стали для ГВ судов внутреннего плавания обусловлено ее лучшими показателями прочности по сравнению с медными сплавами, так как при эксплуатации речных судов возможны удары лопастей о плавающие предметы. На практике для речных судов помимо ранее указанных сплавов применяются специальные сплавы, сталь 20ХГНДЛ, углеродистые стали 30Л, 35Л и др.

Следует отметить, что несмотря на опыт изготовления ГВ из титановых сплавов, распространения в гражданском судостроении титановые сплавы в качестве материала ГВ не получили. По мере изменения номенклатуры сплавов, применяемых для литья ГВ, изменялись также и технологии их ремонта.

Классификация технологий ремонта лопастей, изношенных при кавитации. Кавитация ГВ отличается высокой эрозионной способностью. Это обусловлено нестационарным характером кавитации ввиду того, что ГВ работают в неравномерном поле скоростей. Все технологии восстановления поврежденных при кавитации ГВ можно условно разбить на две группы:

1-я группа — без применения дополнительного материала — шлифованием.

2-я группа — восстановление с применением дополнительного материала:

- с применением металлического материала;
- с применением полимерного материала.

Очевидно, что эффективность указанных методов восстановления изношенных участков лопастей во многом зависит от материала ГВ и величины износа.

Шлифованием ремонтируют лопасти с небольшими по глубине очагами кавитационного износа. В этом случае можно шлифованием снять поврежденный поверхностный слой материала без нарушения геометрии сечения лопасти.

Технологии ремонта, основанные на применении полимеров, находят все большее применение при ремонте ГВ водоизмещающих судов. В отличие от скоростных судов, в частности судов на подводных крыльях, на водоизмещающих судах неравномерность поля скорости в диске ГВ обусловлена неравномерностью попутного потока — движитель располагается за корпусом судна, при этом в потоке наибольшей неравномерности работают концевые сечения лопастей, поэтому очаги кавитационного износа на ГВ водоизмещающих судов возникают в концевых сечениях лопастей. При ремонте лопастей в этих районах приоритетным является восстановление качества поверхности, а вопросы прочности лопасти отходят на второй план.

В технологиях ремонта ГВ с применением металлического материала на основе публикаций, появившихся с середины XX в., можно выделить пять направлений, применяемых по мере развития технологии для восстановления изношенных при кавитации районов лопастей ГВ:

- покрытие ГВ листами более стойкого материала;
- электролитическое нанесение износостойких покрытий ГВ;
- химико-термические способы упрочнения поверхности ГВ;
- напыление изношенных лопастей движителей;
- наплавка изношенных участков лопастей и др.

Следует отметить, что первые четыре направления ремонта ГВ в настоящее время полностью вытеснены наплавкой. Причина заключается в том, что ГВ является массивной деталью и его диаметр на транспортных судах составляет несколько метров. При этом реализация первых четырех из них предполагает, что в технологии задействована вся поверхность ГВ, что является нерациональным ввиду не только финансовых затрат, но и того, что термическое воздействие, являющееся неотъемлемой частью всех этих технологий, будет оказано на материал всего винта, что нежелательно. Кавитационный износ имеет очаговый характер, т. е. представляет собой локальные зоны площадью в несколько сотен квадратных сантиметров, и технологические решения должны реализовываться на этих ограниченных участках. Когда основным материалом для лопастей ГВ являлись углеродистые стали, имеющие низкую коррозионную стойкость, при эксплуатации в морской воде скорость кавитационного изнашивания существенно увеличивалась из-за влияния электрохимической коррозии. Поэтому нанесение любого подходящего с точки зрения технологии коррозионно-стойкого материала повышало стойкость ГВ из углеродистой стали к кавитационному воздействию, так как влияние коррозионного фактора исключалось. В современных условиях, когда основным материалом для изготовления ГВ являются бронзы и нержавеющие стали, указанные технологии не могут дать положительного эффекта.

В последние десятилетия XX в. наблюдался рост исследований по газотермическому напылению ГВ. Однако газотермические покрытия имеют пористость 5–25 % в зависимости от способа напыления, т. е. они не только не будут защищать ГВ от коррозионного воздействия морской воды, но и являются принципиально непригодными для эксплуатации в условиях кавитационного воздействия, в которых работают лопасти ГВ, без дополнительной обработки (например, оплавления самофлюсующихся сплавов или термодиффузионного легирования поверхности хромом и т. п.). Положительный опыт восстановления плазменным напылением существует именно для ГВ из углеродистых сталей небольшого размера самофлюсующимися сплавами серии

ПГ-СР и смесями системы Ni-Ti-Al, а также газопламенным напылением смесью железного порошка, феррохрома и ферромарганца. В то же время если ГВ изготовлен из бронзы или другого медного сплава — более износостойкого материала в условиях кавитации по сравнению с углеродистой сталью, то в этом случае напылением положительного эффекта достичь чрезвычайно трудно, так как стойкость определяется когезионной прочностью покрытия.

Заслуживает внимания технология холодного газодинамического напыления. При холодном газодинамическом напылении образование покрытия происходит при столкновении частиц металла с очень высокой скоростью с подложкой. При ударе частицы пластически деформируются возникает высокая адгезия к подложке: образуются покрытия практически с нулевой пористостью [5], при этом кавитационная износостойкость полученных холодным газодинамическим напылением покрытий превышает износостойкость исходного материала (в компактном состоянии) [6]. Возможно применение холодного газодинамического напыления в сочетании с другими видами обработки [7]. В разное время высказывались идеи о применении холодного газодинамического напыления для ремонта ГВ, однако пока данные о таком применении отсутствуют.

Ремонт лопастей, изношенных при кавитации, наплавкой. Анализ многочисленных актов освидетельствования состояния движительно-рулевых комплексов транспортных судов показывает, что ремонт изношенных участков ведется электродуговой наплавкой. ОСТ5Р.9782–2004² регламентирует зоны ГВ, в которых можно осуществлять ремонт, химический состав наплавочных материалов, режимы наплавки, последующую термообработку и контроль геометрии лопастей. Согласно положениям данного ОСТа, ГВ с небольшой откидкой лопастей можно ремонтировать наплавкой, если очаги кавитационного износа возникают в зонах *В* и *С* (рис. 1 *а, б*). Если кавитационный износ возникает в зоне *А*, то ремонт этих зон можно осуществлять механической обработкой (шлифованием), а разрешение на применение наплавки нужно согласовывать в установленном порядке. Особые требования к зоне *А* обусловлены тем, что корневые сечения лопасти относятся к наиболее нагруженным, при этом на нагнетательной стороне материал лопасти работает на растяжение. Расчет напряжений в статической постановке показывает, что напряжения в корне лопасти достигают 60–70 МПа (рис. 1, *в*). Очаг кавитационного износа служит концентратором напряжения, при коэффициенте концентрации, равном 3,0–4,0, напряжения в зоне очага износа могут достигать предела текучести лопасти. Поэтому для ликвидации очага износа в корне лопасти наплавка является, пожалуй, единственным приемлемым способом, так как восстановить прочность лопасти, что в данном случае является приоритетом, другим способом не удастся.

Практика показывает, что наплавленные участки при последующем доковании обнаруживают появление новых зон кавитационного износа и это неслучайно, поскольку наплавку изношенных бронзовых ГВ ведут прутками такого же состава, как и основной металл, или по крайней мере близкого к нему. ОСТ5Р.9782–2004 рекомендует для наплавки ГВ из латуни применять прутки марки ЛЖМц59–1–1 или БрАМц9–2, для наплавки ГВ из бронзы БрА9Ж4Н4Л — прутки марки БрАЖНМц8,5–4–5–1,5, для наплавки ГВ из бронзы БрА7Мц14Ж3Н2Л — прутки марки БрМцАЖН12–8–3–2. То есть рекомендации данного стандарта соответствуют многолетнему опыту наплавки в судоремонте. Целью их является не повышение кавитационной износостойкости отремонтированных участков, а качественное восстановление геометрии изношенных лопастей, исключаяющее появление дефектов при наплавке. Такая же практика существует и за рубежом, — наплавку изношенных участков бронзовых ГВ ведут прутками из сплава такого же типа, как и сплав винта.

² ОСТ5Р.9782–2004. Винты гребные из сплавов на медной основе. Исправление дефектов и повреждений. Типовой технологический процесс. Принят и введ. в действие Распоряжение Тех. комитета по стандартизации ТК «Судостроение» от 18.01.2004 № ТК-9782–1. Взамен РД5Р.9782–79.

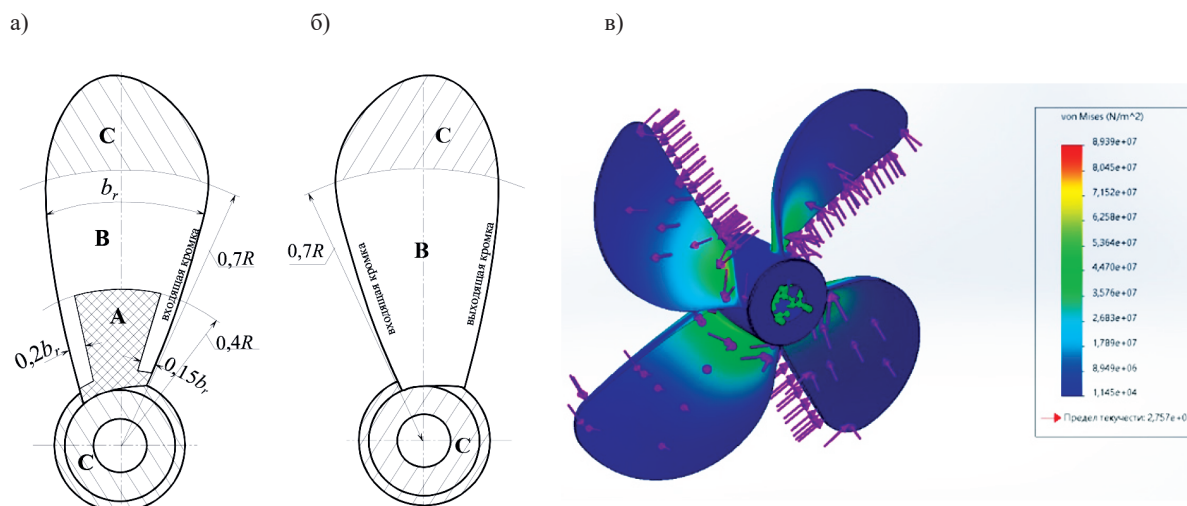


Рис. 1. Ремонтные зоны ГВ судна проекта Atlantic Project II:

a — на нагнетательной поверхности лопасти; *б* — на засасывающей поверхности лопасти;
в — распределение напряжений в лопастях работающего бронзового ГВ диаметром 6,8 м

Наплавка материалами, близкими по составу к материалу ГВ, не позволяет получить покрытия, обеспечивающие более высокую кавитационную износостойкость по сравнению с исходным материалом ГВ. Разработка технологии наплавки упрочняющих составов предполагает прежде всего выбор соответствующего материала, который в наплавленном состоянии превышает по износостойкости исходный материал ГВ в условиях кавитационного воздействия в коррозионно-активной жидкости, т. е. в условиях эксплуатации. Так как наплавленный участок небольшой по площади и окружен материалом винта, необходимо, чтобы нанесенное покрытие являлось по отношению к материалу винта в морской воде катодом. В этом случае, как показали исследования Ю. Е. Зобачева, если отношение площади анода к катоду больше чем 4: 1, коррозией основного металла можно пренебречь. Таким образом, нанесенный материал должен по кавитационной износостойкости превосходить материал-основу, а его стационарный потенциал в морской воде быть больше, чем потенциал материала ГВ.

Известно, что наибольшей кавитационной износостойкостью обладают металлические сплавы, дисперсионно-твердеющие после соответствующей термической обработки, и сплавы, испытывающие фазовые превращения при микроударном нагружении. Из дисперсионно-твердеющих медных сплавов зарубежными исследователями в разное время предлагались бериллиевая бронза и алюминиевая бронза, легированная кобальтом. Бериллиевую бронзу, по всей видимости, целесообразно применять для судов на подводных крыльях, на движителях которых процессы кавитационного разрушения протекают особенно интенсивно. Натурные испытания ГВ из этой бронзы на судне на подводных крыльях дали положительные результаты. Однако можно предположить, что в условиях эксплуатации ГВ транспортных судов преимущество бериллиевой бронзы для кавитационной стойкости утрачивается из-за ее более низкой коррозионной стойкости по сравнению с алюминиевой бронзой. Преимущество бронзы, легированной кобальтом, по сравнению с бериллиевой бронзой состоит в том, что она значительно превышает ее по сопротивлению коррозии.

Главный недостаток дисперсионно-твердеющих сплавов в том, что они требуют проведения специальной термической обработки для дисперсионного выделения твердой фазы. Такую обработку очень сложно провести для локального наплавленного участка лопасти, а тем более без снятия ГВ с гребного вала, так как для этого требуется наличие больших печей. Поэтому предпочтительным является использование структурно нестабильных сплавов, упрочняющихся не только при пластической деформации, но и в результате фазовых превращений. В этом случае часть энергии внешнего воздействия идет на распад высокотемпературной фазы

с образованием стойких мартенситных структур и лишь оставшаяся часть — на микроударное разрушение сплава:

$$E = A_{\text{фаз.пр}} + A_{\text{разр}}, \quad (1)$$

где E — энергия ударов при кавитационном воздействии;

$A_{\text{фаз.пр}}$ — работа фазовых превращений в сплаве при кавитационных ударах;

$A_{\text{разр}}$ — работа разрушения образовавшейся новой фазы.

Такие нестабильные структуры можно получить в высокоалюминиевых бронзах (содержание алюминия 11,0–14,5 %) и в сталях с нестабильным аустенитом.

Общепринято, что стойкость металла при микроударном нагружении определяется прочностью его микрообъемов. Микроструктура двухфазного сплава Cu-Al при температуре выше 565 °С состоит из больших «островков» твердого раствора α -фазы и β -фазы — электронного соединения переменного состава. В зависимости от термической обработки β -фаза либо распадается на эвтектоидную смесь ($\alpha + \gamma_2$), где γ_2 — соединение электронного типа, либо превращается в бейнитную или мартенситную структуру. При этом стойкость этих сплавов, согласно К. М. Прис, довольно значительно различается друг от друга. Как показали исследования И. Н. Богачева, Р. И. Минца и Т. М. Петуховой, кавитационное разрушение начинается с менее стойкой α -фазы: ее глобулярные частицы повышают кавитационную стойкость, а вытянутые, пластинчатые — снижают. Эвтектоидные участки подвергаются обезалюминиванию (коррозии) в морской воде³. Это объясняется тем, что γ_2 -фаза, богатая алюминием, является анодной по отношению к α -фазе. Сопротивление коррозии у алюминиевой бронзы будет хорошим, если исключить расположение γ_2 -фазы в виде непрерывной сетки по границам α -фазы⁴, обеспечив мелкодисперсную глобулярную форму γ_2 - и α -фазы.

При содержании в бронзе более 9 % алюминия высокотемпературная β -фаза способна не распадаться полностью на ($\alpha + \gamma_2$)-эвтектоид и испытывать мартенситное превращение при микроударном нагружении. Например, Т. М. Петухова предложила кавитационно-стойкую бронзу, испытывающую фазовые превращения при кавитационном воздействии для изготовления деталей гидрооборудования следующего состава: 12,5–14,5 % Al, 1–6 % Ni, 1–4 % Co, 1–3 % Mn, остальное Cu.

Для обеспечения высокой кавитационной износостойкости необходимо получить в наносимом покрытии как можно больше метастабильной β -фазы. При этом мартенситная фаза в Al-бронзах не столь прочна при кавитационном воздействии, как аналогичная фаза в железоуглеродистых сплавах, поэтому для повышения ее кавитационной износостойкости, т. е. увеличения $A_{\text{разр}}$ в выражении (1), необходимо дополнительное легирование. Например, в работе [8] предложено легировать высокоалюминиевую бронзу малыми количествами титана, так как титан образует высокодисперсные интерметаллиды, упрочняющие мартенситную матрицу.

Впервые медный мартенсит в практике восстановления изношенных кавитацией ГВ был использован О. Г. Быковским⁵ при восстановлении латунных ГВ судов на подводных крыльях бронзами БрАН14–3 и БрАЖН14–4–6 с применением ручной дуговой наплавки покрытыми электродами и аргоно-дуговой наплавки вольфрамовым электродом. Натурные испытания показали, что износостойкость наплавленных зон более чем в 2 раза превышает этот показатель для материалов движителей судов на подводных крыльях, однако это не приводит к кардинальному улучшению ситуации: существенной разницы нет, будет глубина кавитационного износа после 200 ч составлять 10 мм на латунных ГВ или за то же время — 5 мм на наплавленной бронзе. Данное обстоя-

³ Зимнева Е. М. Морская коррозия медных сплавов / Е. М. Зимнева, Л. И. Шибалова, В. П. Шеманова [и др.]. Л.: Изд. — во судостроительной промышленности, 1963. 88 с.

⁴ Соколов Н. Н. Гребные винты из алюминиевой бронзы / Н. Н. Соколов, С. П. Лазаренко, В. И. Журавлев. Л.: Судостроение, 1971. 288 с.

⁵ Быковский О. Г. Исследование кавитационной эрозии, разработка электродных материалов и технологий наплавки гребных винтов СПК: автореф. дис... канд. техн. наук. Киев, 1969.

ятельство еще раз подтверждает низкую эффективность борьбы с кавитационным износом заменой материала в жестких условиях кавитационного воздействия. Известно, что интенсивность кавитационного изнашивания ГВ судов на подводных крыльях, работающих в скошенном потоке, чрезвычайно велика. Неизвестно, как себя поведет медный мартенсит в условиях малоинтенсивного кавитационного изнашивания ГВ морских транспортных судов; представляется, что для достижения эффекта в этом случае необходимо будет обеспечить соответствующую коррозионную стойкость метастабильных сплавов. Для этого необходимо обеспечить как можно более полное подавление распада высокотемпературной β -фазы на эвтектоид с выделением анодной γ_2 -фазы.

Одной из особенностей наплавки алюминиевых бронз, содержащих 10–14 % Al, является образование тугоплавкой и труднорастворимой оксидной пленки Al_2O_3 . Присадочных прутков из высокоалюминиевых бронз отечественная промышленность не производит. Как показали исследования О. Г. Быковского, в качестве электродного стержня весьма эффективным оказалось использование композитной проволоки, получаемой путем совместной протяжки медной ленты и алюминиевой проволоки соответствующих размеров через твердосплавную фильеру.

Метастабильные структуры можно получить и на железоуглеродистых сплавах. Таковыми сплавами являются сталь 30X10Г10, разработанная более полувека назад И. Н. Богачевым и Р. И. Минцем, и сталь 25X14Г8Т, разработанная А. В. Картышовым. Несмотря на то, что сталь 30X10Г10 была рекомендована ГОСТ 10543–75⁶ для наплавки кавитационно-стойких слоев, для условий малоинтенсивного кавитационного изнашивания она не подходит, так как не обладает достаточной коррозионной стойкостью из-за низкого содержания в ней хрома (менее 13 %). Сталь 25X14Г8Т является коррозионно-стойкой, но промышленностью также не выпускаются прутки из стали 25X14Г8Т. Необходимо отметить, что стали с нестабильным аустенитом нетехнологичны, а повышенное содержание в них марганца требует хорошей защиты сварщика при проведении наплавочных работ. По всей видимости, применение сплавов с метастабильной структурой требует тщательного выбора режимов последующей после наплавки механической обработки наплавленного участка, так как пластическая деформация при резании может приводить к преждевременным фазовым превращениям, что снижает кавитационную износостойкость наплавленного слоя.

За последние 30 лет количество работ, темой которых является создание кавитационно-износостойких сплавов, резко сократилось. Отчасти это вызвано тем, что не удалось создать сплав, обладающий комплексом необходимых свойств: высокой кавитационной износостойкостью, высокой коррозионной стойкостью и высокой технологичностью. Именно низкая технологичность предлагаемых износостойких сплавов привела к тому, что в современной практике ремонта изношенных при кавитации ГВ используют материалы, близкие по составу материалу ГВ, т. е. приоритет отдают именно регулярному восстановлению качества поверхности, а не повышению ее износостойкости. В настоящее время исследовательские работы в основном направлены на технологические методы повышения износостойкости, т. е. методы, не предполагающие использование для повышения кавитационной износостойкости присадочных материалов, принципиально отличных от материала ГВ. Далее рассмотрены несколько направлений развития технологических методов повышения износостойкости зон кавитационного износа на ГВ при ремонте.

Представляет интерес возможность получения высокой кавитационной износостойкости наплавленного металла в процессе его плавления и охлаждения. В статье [9] рассмотрены исследования кавитационной износостойкости наплавленного металла на пластину из литой алюминиево-марганцевистой бронзы. Состав бронзы следующий: Cu — основа; 11–14 % Mn, 7–11 % Al, 2,5–6 % Fe и 1,5–3 % Ni. В пластине из этой бронзы была сделана U-образная канавка, заполняемая сваркой с использованием присадочного прутка того же состава. При этом отмечалось, что в зоне сварки (в наплавленном металле) образовалось очень мелкое зерно вследствие очень быстрого охлаждения и кристаллизации. Быстрое охлаждение не задержало выделение κ_{II} -фазы, но задержало рост α -фазы, которая выделилась по границе и внутри β -фазы, т. е. микроструктура наплавленного металла состояла из α -, β - и κ_{II} -фазы. Такая структура обеспечила кратное уменьшение потери

⁶ ГОСТ 10543–75. Проволока стальная наплавочная. Изд. офиц. Введ. 01.07.83.

массы при кавитационном воздействии (рис. 2, а), однако при этом продолжительность инкубационного периода практически не увеличилась. По всей видимости, в действительности кавитационный износ уменьшается за счет измельчения зерна и, как следствие, уменьшения размера частиц износа.

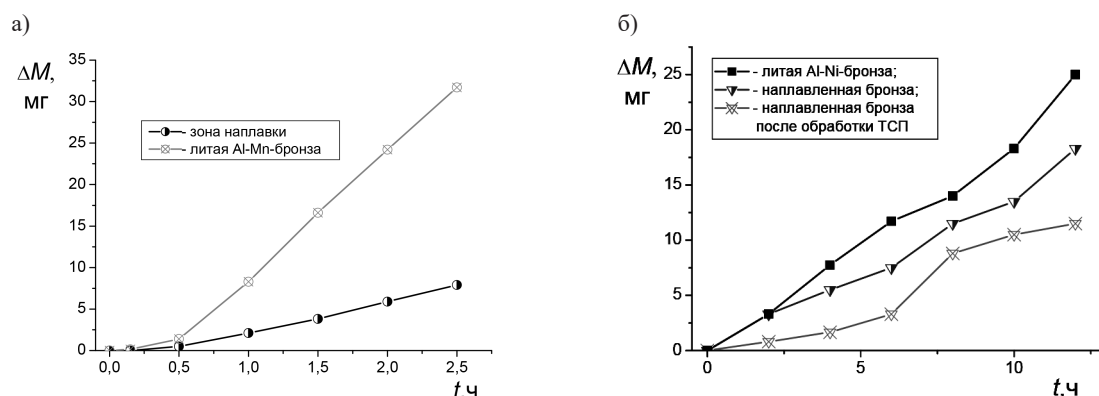


Рис. 2. Кинетические кривые кавитационного изнашивания в пресной воде литой Al-Mn-бронзы и зоны наплавки (а) [9], а также в 3,5%-м водном растворе NaCl литой Al-Ni-бронзы, зоны наплавки и зоны наплавки после обработки ТСП (б) [11]

Следует отметить, что испытания на кавитационную износостойкость проводили на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе, что позволило реализовать ударное воздействие микроструй, диаметр которых составлял десять и более микрон [10]. В этих условиях измельчение зерна, по всей видимости, не оказывает влияния на продолжительность инкубационного периода, так как пластичность металла в микрообъемах не изменяется. Вероятно, при испытании на струеударном стенде, при диаметре струи, равном нескольким миллиметрам, наряду с уменьшением скорости изнашивания было бы зарегистрировано также и увеличение инкубационного периода. Дальнейшие исследования в этом направлении должны быть сконцентрированы на оптимальном выборе режимов наплавки для получения максимально возможной износостойкости наплавленного металла.

В работе [11] предлагается осуществлять наплавку ГВ из алюминий-никелевой бронзы в сочетании с обработкой трением с перемешиванием (ТСП). В отличие от традиционного способа сварки ТСП [12] в статье [11] предлагается сначала производить традиционную наплавку изношенных при кавитации районов ГВ с применением присадочного прутка аналогичного по составу материалу ГВ, а затем — обработку ТСП. При этом использовалась существенно большая скорость вращения инструмента-шпинделя и более низкая скорость прижима торца шпинделя к бронзе. Материал наплавки при трении размягчается, торец вращающегося шпинделя частично погружается в бронзу и при поперечном движении шпинделя происходит перемешивание наплавленного материала и измельчение его зерна. Дополнительное преимущество такой обработки заключается в ликвидации дефектов (пор) в наплавленном металле. Испытания в 3,5%-м водном растворе NaCl показали, что обработка ТСП существенно увеличивает кавитационную износостойкость наплавленной бронзы (рис. 2, б), при этом и скорость коррозии после обработки ТСП снижается более чем в два раза. Необходимо отметить, что бронза в наплавленном состоянии на рис. 2, б, так же, как и на рис. 2, а, показала более высокую износостойкость по сравнению с исходным (литым) состоянием.

В качестве одного из возможных способов повышения кавитационной износостойкости металлов традиционно рассматривался наклеп. При этом до сих пор нет единого мнения об эффективности предварительной холодной пластической деформации на износостойкость металла. Ранее в работе [8] отмечалось, что предварительная пластическая деформация уменьшает продолжительность инкубационного периода кавитационного изнашивания. Тем не менее данные по предварительной обкатке шариком аустенитных сталей [13] показывают, что их кавитацион-

ная износостойкость заметно увеличилась. Положительное влияние предварительной пластической деформации на увеличение кавитационной износостойкости подтверждается также опытами на аустенитно-ферритной азотированной стали [14] (рис. 3, а) и на наплавленном слое из аустенитной стали [15] (рис. 3, б).

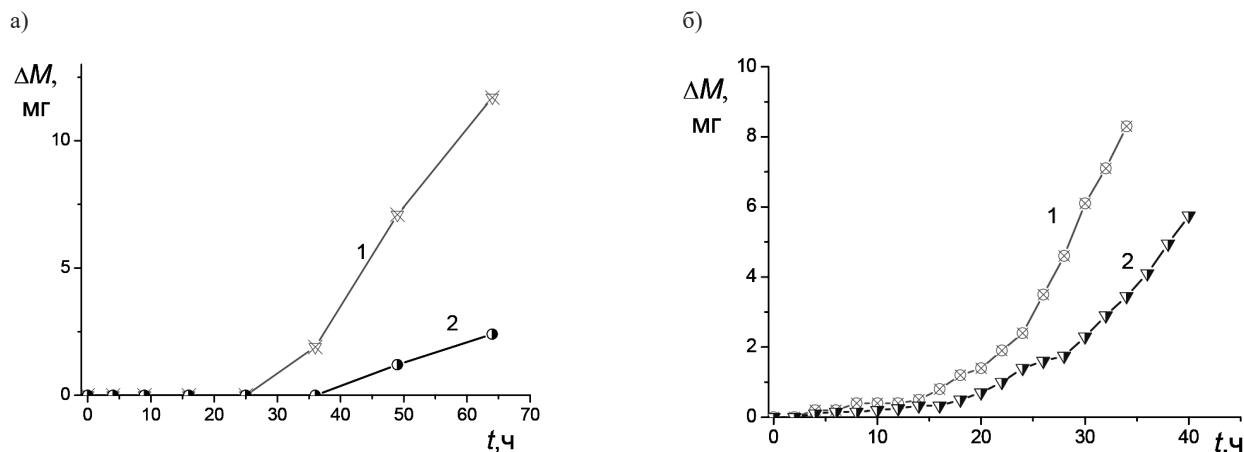


Рис. 3. Кавитационное изнашивание азотированной аустенитно-ферритной стали (а) до 1 и после 2 поверхностного пластического деформирования обкаткой шариком [14] и наплавки из аустенитной Cr-Mn-стали (б) с недеформированной 1 и пластически деформированной 2 в результате фрезерования поверхностью [15] при испытании на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе в пресной воде

При кавитационном воздействии металл испытывает большие пластические деформации, которые накапливаются от цикла к циклу (от удара к удару). В результате разрушение носит квазистатический характер, а предварительная пластическая деформация приводит к расходу запаса пластичности, что должно сокращать продолжительность инкубационного периода. Однако предварительная пластическая деформация приводит также к повышению твердости поверхности, что, в свою очередь, ведет к снижению жесткости схемы напряженного состояния при кавитационных ударах [8], что, наоборот, увеличивает продолжительность инкубационного периода. По всей видимости, окажет ли предварительная пластическая деформация металла положительный эффект на его кавитационную износостойкость, будет зависеть от того, какой из указанных факторов является доминирующим. В любом случае ответ на вопрос, является ли положительное влияние предварительного наклепа на износостойкость особенностью только аустенитной стали, требует дальнейшего исследования и анализа.

Ремонт лопастей, изношенных при кавитации, с применением полимерных материалов. Совершенствование технологии ремонта изношенных при кавитации лопастей ГВ водоизмещающих судов, основанной на нанесении полимерных составов, является перспективным направлением. Преимущества указанной технологии: трудоемкость существенно ниже трудоемкости ремонта с применением наплавки, перечень подготовительных работ сведен к минимуму и часто не требуется демонтаж ГВ.

Сравнительный анализ стойкости к кавитационному воздействию разных полимеров: термопластичных (полиэтилена высокой плотности, полипропилена, полиамида) и терморективных (на основе эпоксидной смолы) показал, что самую низкую износостойкость в условиях вибрационной кавитации имеет эпоксидный полимер, а самую высокую — термопластичные полимеры: полиэтилен высокой плотности и полиамид [3]. Это подтверждается также экспериментами авторов данной статьи, проведенными на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе при частоте и амплитуде колебаний торца концентратора, равными около 22 кГц и 30 мкм соответственно (рис. 4). Видно, что продолжительность инкубационного периода полиэтилена и капролона (рис. 4, а) существенно превосходит таковую для сплавов ГВ (рис. 4, б).

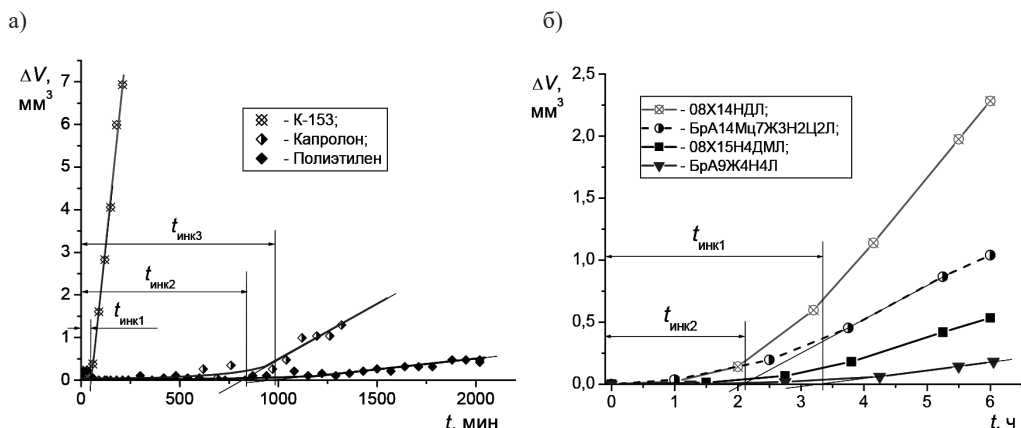


Рис. 4. Кинетические кривые кавитационного изнашивания полимеров (а) и винтовых сплавов (б) при испытании на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе в пресной воде

Тем не менее в практике судоремонта, принимая во внимание технологичность термореактивных смол, а также чрезвычайно низкую адгезию термопластичных полимеров к металлам, полимерные композиции для ремонта оборудования в подавляющем большинстве случаев составляются с применением в качестве связующего именно термореактивных смол (эпоксидных, полиэфирных, полиуретановых). Прежде всего, это обусловлено их высокой технологичностью, так как в исходном (низкомолекулярном) состоянии они представляют собой вязкие жидкости, что позволяет заполнять ими полости любой формы, которая фиксируется после отверждения с применением различных дополнительных реагентов. В судоремонте нашли широкое применение зарубежные и отечественные полимерные составы. Основные характеристики некоторых из них приведены в следующей таблице.

Примеры полимерных составов, используемых в судоремонте, и их характеристики

Марка состава	Состояние состава	Наполнитель	Минимальная температура применения, °С	Время затвердевания, ч	Прочность*(МПа) на сдвиг / сжатие, не менее
Belzona 1121 (Супер XL–Металл)	Жидкость	Стальной порошок	5	24	14/93,8
Belzona 2141 (ACR-Fluid Elastomer)	Жидкость	Нет	5	12	–
Chester Metal Ceramic FSL	Жидкость	Металлический порошок, керамический порошок, волокно	5	7	24/120
Devcon Brushable Ceramic	Паста	Керамический порошок	15	24	22/105
Devcon Titanium Putty	Паста	Порошок титана	15	24	17/130
Devcon Bronze Putty (BR)	Паста	Порошок бронзы	15	24	18,5/58,9
Diamant Moglice	Паста	Нет	–10	18	66/120
Weicon BR	Паста	Порошок бронзы	5	24	18/82
УП-5–177	Жидкость	Порошки оксида алюминия и кремнезема, сажа, стеклянные и синтетические волокна	0	24	18/148
УП-5–177–1	Жидкость	Порошки никеля, ванадия, бериллия или цинка	0	24	13/132
К-153	Жидкость	Нет	15	24	13/160
Спрут-9М	Жидкость	Нет	–5	24	90/260

*При слое 0,2–0,5 мм.

Из приведенных в таблице только составы «Спрут-9М» и Belzona 2141 (ACR-Fluid Elastomer) созданы не на основе эпоксидных смол. Состав «Спрут-9М» готовят на основе полиэфирной смолы ПН-609–21М с ускорителем полимеризации НК-1, модифицирующей добавкой и добавкой инициатора полимеризации. Belzona 2141 (ACR-Fluid Elastomer) является двухкомпонентным и состоит из полиуретановой смолы с отвердителем. Остальные составы: Belzona Супер XI–Металл, Chester Metal Ceramic FSL, Devcon⁷, K-15, УП-5–177, УП-5–177–1, Diamant Moglice, Weicon BR, имеют эпоксидную основу. Эпоксидные полимеры находят наиболее широкое применение при ремонте ГВ, так как обладают многими достоинствами [16]: низким значением усадки, сравнительно хорошей адгезией к металлам, сравнительно высокой прочностью, хорошей стойкостью к воде, высокой технологичностью, не выделяют вредных веществ. В этом отношении составы на основе полиэфирных смол уступают эпоксидным составам.

Из трех видов составов (на основе эпоксидных, полиэфирных, полиуретановых смол) наиболее перспективным для ремонта лопастей ГВ с очагами кавитационного износа являются полиуретановые составы. По адгезии к металлам полиуретановые составы не только не уступают эпоксидным компаундам, но даже несколько превосходят их, а опыты на кавитационный износ показали, что кавитационная износостойкость состава Belzona 2141 (ACR-Fluid Elastomer)кратно превосходит износостойкость низкоуглеродистой стали [17], т. е. она сопоставима с износостойкостью винтовых металлических сплавов. Тем не менее в настоящее время в практике ремонта ГВ полиуретановые составы применяются существенно реже эпоксидных.

Возможность использования полимерных составов при ремонте ГВ отмечается также в п. 11.2.7 методических рекомендаций⁸, где указано, что устранение язв, вызванных коррозией или эрозией, должно производиться по возможности без заварки. В первую очередь должны быть устранены источники концентрации напряжений, т. е. острые края и углы язв путем вырубки и фрезерования абразивным инструментом. Шлифование после вырубки является обязательным. Вместо механической обработки, по согласованию с Российским морским регистром судоходства, дефекты могут быть устранены полимерными ремонтными составами. В прил. 6 данных методических рекомендаций указано, что эпоксидные композиты, используемые в судоремонте, которые получают путем смешения модифицированной эпоксидной диановой смолы (основы) и отвердителя, могут дополнительно содержать наполнители, растворитель (разбавитель) и армирующий материал. Свойства эпоксидного компаунда определяются сочетанием основы и отвердителя, которые выбираются в зависимости от назначения композиции и условий нанесения.

При выборе эпоксидных композиций рекомендуется руководствоваться положениями «Руководства по ремонту судовых металлических конструкций, узлов судовых механизмов и устройств, гребных винтов с применением композитных (композиционных) и полимерных материалов⁹, в соответствии с которыми устранение кавитационного износа лопастей рекомендуется осуществлять созданием многослойного покрытия (рис. 5). После очистки и подготовки поверхности сначала наносят ремонтный эпоксидный состав 4 с металлическим наполнителем для заполнения основного объема очага износа, затем — слой грунтовки 3 толщиной 20–30 мкм, затем — демпфирующий слой 2 из эластичного компаунда суммарной толщиной 0,5 мм, сверху — слой износостойкой эпоксидной краски толщиной 0,25 мм.

Трудно оценить долговечность такого многослойного покрытия (рис. 5), так как данные с результатами эксплуатации ГВ, отремонтированных по изложенной технологии, недоступны. Следует отметить, что технические решения по применению полимерных составов для ремонта ГВ, изношенных при кавитации, в настоящее время не всегда представляются обоснованными. Это

⁷ Под маркой Devcon выпускается линейка ремонтных составов, включая перечень продуктов с наполнителями в виде металлических порошков (бронзовых, титановых, стальных, алюминиевых).

⁸ Методические рекомендации по техническому наблюдению за ремонтом морских судов. СПб.: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2020. 221 с.

⁹ СТО ЯКУТ.21.52–2017. Руководство по ремонту судовых металлических конструкций, узлов судовых механизмов и устройств, гребных винтов с применением композитных (композиционных) и полимерных материалов. Типовые технологические процессы. СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2017. С. 73–74.

связано с тем, что рекомендации по применению не основываются на реальных условиях кавитационного воздействия на лопасти ГВ в эксплуатации.

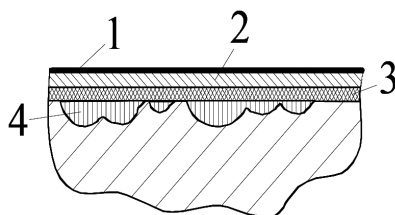
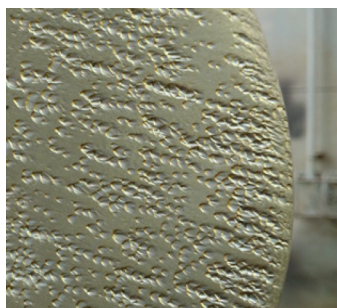


Рис. 5. Устранение кавитационной эрозии гребных винтов в случае мелких язвин (а) и крупных полостей (б):
1 — износостойкий слой; 2 — демпфирующий слой;
3 — грунтовка; 4 — ремонтный эпоксидный состав

Исследования очагов кавитационного износа на ГВ, проведенные на кафедре технологии судоремонта ГУМРФ [18], [19], показали, что основной механизм кавитационного воздействия на поверхность лопастей ГВ — удары струй (рис. 6), причем направленные под углом к поверхности лопасти ГВ. Диаметр струй составляет несколько миллиметров, а скорость достигает 600 м/с [19]. Ввиду таких больших диаметров и скоростей ударных струй маловероятно, что многослойная конструкция, приведенная на рис. 5, покажет хорошую долговечность в условиях эксплуатации ГВ: тонкий сравнительно жесткий слой 1, расположенный на существенно более податливом слое 2, не выдержит таких ударов. К таким необоснованным решениям можно отнести также применение наполнителей в составах, предназначенных для ремонта лопастей ГВ с очагами кавитационного износа.

а)



б)

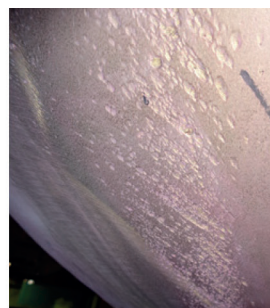


Рис. 6. Вмятины от кавитационных ударов на лопастях ГВ теплоходов Atlantic Runner (а) и «Ангара» (б)

Очевидно, что применение длиноволокнистых или листовых наполнителей делает ремонтный состав нетехнологичным, поэтому в составы для ремонта ГВ вводят только порошковые наполнители или наполнители в виде рубленого волокна. Например, из составов, указанных в таблице (с. 956), порошковый наполнитель (как правило, металлический) содержат: Belzona «Супер XI–Металл», Chester Metal Ceramic FSL, Devcon, Diamant Moglice и Weicon BR. Следствием того, что удар струй по поверхности лопасти при схлопывании кавитационной каверны происходит под углом к поверхности, скорость растекания струи $v_{рас}$ существенно превосходит скорость удара $v_{стр}^{10}$, при этом $v_{рас} = 2v_{стр} \dots 3v_{стр}$ (рис. 7).

Такие большие скорости позволяют за время существования парогазовой фазы, отсчитываемое от «вспышки» кавитации в момент прохождения лопасти в верхнем положении пика ахтерштевня до схлопывания кавитационной каверны при приближении лопасти к горизонтальному

¹⁰ Bowden, F. P. The deformation of solids by liquid impact at supersonic speeds / F. P. Bowden, J. H. Brunton // Proceedings of the Royal Society, Series A. 1961. Vol. 263. Pp. 433–450.

положению, пройти расстояние S , составляющее нескольких сантиметров и более. Растекающиеся струи создают большие касательные напряжения на поверхности, а все дефекты на поверхности становятся потенциальными очагами кавитационного разрушения. К таким дефектам относятся не только границы A и B между материалом лопасти и ремонтным составом (см. рис. 7), но и границы между частицами порошкового наполнителя и полимерной матрицей, выходящие на поверхность.

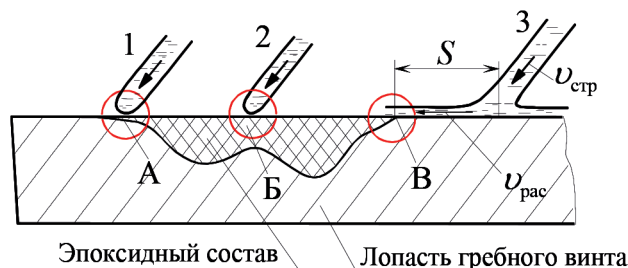


Рис. 7. Схема кавитационного воздействия на границу между полимером и металлом лопасти: 1, 2, 3 — ударные струи, образующиеся при схлопывании кавитационной каверны

Испытания составов Devcon Titanium Putty и Devcon Bronze Putty [20], содержащих титановый и бронзовый порошок, показали, что кавитационное разрушение происходит путем разрушения границ раздела и выламывания металлических частиц из полимерной матрицы. Аналогичный механизм разрушения зарегистрирован при испытании эпоксидного компаунда К-153 с добавкой порошка из алюминиевой бронзы [21]. Такое влияние порошкового наполнителя приводит к тому, что на кинетических кривых изнашивания эпоксидных составов с порошковым наполнителем отсутствует инкубационный период (рис. 8), который является важнейшим показателем кавитационной износостойкости применительно к материалам ГВ. Тот же состав К-153, но без добавления порошкового наполнителя изнашивается с выраженным инкубационным периодом (см. рис. 8).

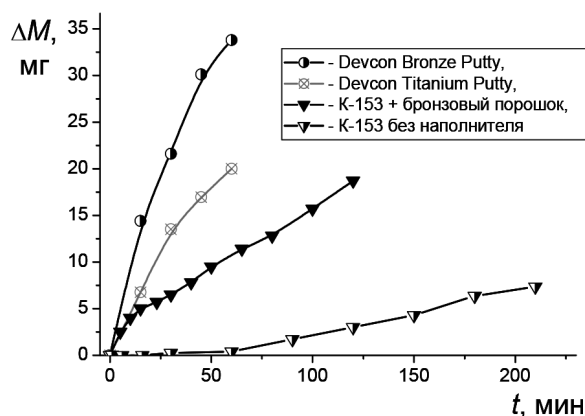


Рис. 8. Кинетические кривые кавитационного изнашивания эпоксидных компаундов с порошковым наполнителем и без него

Проведенный анализ показал, что не менее важное влияние, чем кавитационная износостойкость, на долговечность полимерного ремонтного состава в условиях эксплуатации ГВ оказывает адгезия полимера к материалу лопасти. Удовлетворительная кавитационная износостойкость ремонтного состава обеспечит его долговечность в районе B (см. рис. 7), однако при недостаточной адгезии разрушение начнется быстрее в районах A и B , и прежде, чем появится кавитационный износ в центральной части заделки, может произойти ее отслаивание в результате разрушения границ A и B и попадание воды между поверхностью лопасти и полимерной заделкой.

Разрушение покрытий отслаиванием подтверждается также опытом эксплуатации ГВ, отремонтированных с помощью эпоксидных компаундов, и это не случайно, так как эксперименты на адгезию показали, что предел прочности эпоксидного компаунда превышает прочность на отрыв компаунда от бронзовой поверхности практически в 30 раз [22]. Поэтому дальнейшие исследования по разработке технологии ремонта ГВ с применением полимерных составов должны быть направлены в первую очередь на обеспечение стойкости к кавитационному воздействию границ сопряжения ремонтного состава с лопастью, выходящих на поверхность, и повышению адгезии ремонтных составов к материалу ГВ. Если удастся решить эту проблему, то технология ремонта с применением полимерных составов будет постепенно вытеснять наплавку из практики ремонта ГВ.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Начиная с середины XX в. произошли кардинальные изменения в номенклатуре сплавов, применяемых для изготовления ГВ: на смену углеродистым сталям и латуням пришли алюминиевые бронзы и нержавеющие стали, что повлекло за собой изменение характера кавитационных повреждений лопастей и подходов к ремонту ГВ.

2. Очаги кавитационного износа на ГВ из алюминиевых бронз и нержавеющих сталей носят выраженный локальный характер, поэтому основной технологией ремонта в настоящее время является наплавка, позволяющая обеспечить локальное восстановление лопастей.

3. Несмотря на большой объем исследовательских работ, проведенных начиная с середины XX в. по разработке износостойких материалов для ремонта поврежденных при кавитации ГВ, не удалось создать износостойкий сплав, обладающий высокой технологичностью и коррозионной стойкостью.

4. Технологичность ремонтных материалов является в настоящее время основным критерием выбора ремонтного материала. В практике судоремонта приоритет отдают регулярному восстановлению качества поверхности лопастей, а не повышению ее износостойкости, поэтому наплавку производят, как правило, с использованием присадочных прутков, схожих по составу с материалом ГВ. Усилия в настоящее время направлены на разработку технологических методов повышения износостойкости наплавленного металла, таких как обработка трением с перемешиванием, обработка поверхностным пластическим деформированием и др.

5. На транспортных судах очаги повреждения ГВ возникают в основном в концевых сечениях лопастей, поэтому можно считать, что ремонт таких винтов путем нанесения полимерных составов является перспективным. Трудоемкость ремонта с использованием полимеров существенно ниже трудоемкости ремонта с применением наплавки; перечень подготовительных работ сведен к минимуму, и часто не требуется демонтаж ГВ.

6. Применяемые в настоящее время полимерные ремонтные составы и технологии разрабатываются без учета особенностей кавитационного воздействия на лопасти ГВ в эксплуатации. Поэтому некоторые решения представляются необоснованными, в частности это касается введения порошкового наполнителя в полимерные составы для ремонта ГВ.

7. Долговечность полимерного ремонтного состава в условиях кавитации ГВ определяется не только собственно кавитационной износостойкостью состава, но в не меньшей мере его адгезией к материалу лопасти. Из-за локального характера кавитационных повреждений на лопастях ГВ невозможно избежать появления на поверхности лопасти границы между полимерным составом, которым отремонтирован очаг кавитационного износа, и материалом лопасти. Эта граница является наиболее слабым местом, так как адгезия полимера к металлу более, чем на порядок ниже прочности самого полимера. По этой же причине использование порошкового наполнителя в полимерной матрице приводит к выходу границ между частицами наполнителя и полимерной матрицей на поверхность. Эти границы являются очагами кавитационного разрушения: изнашивание происходит путем выламывания частиц из полимерной матрицы, при этом процесс изнашивания идет без инкубационного периода. В то же время использование гомогенного полимерного

состава позволяет кардинально изменить кинетику изнашивания: появляется инкубационный период — важнейший показатель кавитационной износостойкости материалов ГВ.

Благодарности (Acknowledgements)

Авторы выражают глубокую благодарность генеральному директору ЗАО «Канонерский судоремонтный завод» (Санкт-Петербург) Н. М. Вихрову и главному технологу ЗАО «Канонерский судоремонтный завод» Е. О. Горбаченко за возможность осмотра и анализа кавитационных повреждений гребных винтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. — EDN РТРСТР.
2. Gao, G. Cavitation erosion mechanism of 2Cr13 stainless steel / G. Gao, Zh. Zhang. // Wear. — 2022. — Vol. 488. — Pp. 204137. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204137.
3. Hattori S. Cavitation erosion resistance of plastics / S. Hattori, T. Itoh // Wear. — 2011. — Vol. 271. — Pp. 1103–1108. DOI:10.1016/j.wear.2011.05.012.
4. 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. — 10 p.
5. Koivuluoto H. High-pressure cold sprayed Ni and Ni-Cu coatings: improved structures and corrosion properties / H. Koivuluoto, A. Milanti, G. Bolelli, L. Lusvarghi, P. Vuoristo // Journal of Thermal Spray Technology. — 2014. — Vol. 23. — Is. 1–2. — Pp. 98–103. DOI: 10.1007/s11666-013-0016-7.
6. Jiang X. Microstructure, hardness and cavitation erosion resistance of different cold spray coatings on stainless steel 316 for hydropower applications / X. Jiang, N. Overman, C. Smith, K. Ross. // Materials Today Communications. — 2020. — Is. 25. — Pp. 1–27. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101305.
7. Bray M. The laser-assisted cold spray process and deposit characterization / M. Bray, A. Cockburn, W. O'Neil // Surface and Coatings Technology. — 2009. — Vol. 203. — Pp. 2851–2857. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.135.
8. Цветков Ю. Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
9. Li X. Y. Cavitation erosion and corrosion behavior of copper–manganese–aluminum alloy weldment / X. Y. Li, Y. G. Yan, L. Ma, Z. M. Xu, J. G. Li // Materials Science and Engineering A. — 2004. — Vol. 382. — Pp. 82–89. DOI:10.1016/j.msea.2004.04.032.
10. Lu X. An equivalent method of jet impact loading from collapsing near-wall acoustic bubbles: A preliminary study / X. Lu, Ch. Chen, K. Dong, Z. Li, J. Chen // Ultrasonics Sonochemistry. — 2021. — Vol. 79. — Pp. 105760. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105760.
11. Ahmad A. Refurbishing damaged surfaces of nickelaluminum bronze propellers: A robotic approach using gas metal arc welding and friction stir processing / A. Ahmad // Proceedings of 8th International Conference on Advanced Materials Engineering and Technology (ICAMET 2020) AIP Conf. Proc. — 2021. — Vol. 2347. — Is. 1. — Pp. 020156–1–020156–10. DOI: 10.1063/5.0053484.
12. Bakshi D. A. Detailed Study on Friction Stir Welding and Friction Stir Processing — A Review Paper / D. Bakshi, Ch. Prakash, S. Singh, R. Kumar, D. Ashri // International Journal of Industrial Engineering and Technology — 2014. — Vol. 4. — Is. 1. — Pp. 1–22.
13. Muñoz-Cubillos J. On the cavitation resistance of deep rolled surfaces of austenitic stainless steels / J. Muñoz-Cubillos, J. J. Coronado, S. A. Rodríguez // Wear. — 2019. — Vol. 428–429. — Pp. 24–31. DOI: 10.1016/j.wear.2019.03.001.
14. Mesaa D. H. Influence of cold-work on the cavitation erosion resistance and on the damage mechanisms in high-nitrogen austenitic stainless steels / D. H. Mesaa, C. M. Garzón, A. P. Tschiptschin // Wear. — 2011. — Vol. 271. — Pp. 1372–1377. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.063.
15. da Cruz J. R. Effect of Cold Work on Cavitation Resistance of an Austenitic Stainless Steel Coating / J. R. da Cruz, S. L. Henkeb, A. S. Clímaco Monteiro d'Oliveir // Materials Research. — 2016. — Vol. 19. — Is. 5. — Pp. 1033–1041. DOI: 10.1590/1980–5373-MR-2015-0442.

16. 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.
17. Bolewski L. Cavitation erosion degradation of belzona coating / L. Bolewski, M. Szkodo, M. Kmiec's // *Advances in materials science*. — 2017. — Vol. 17. — Is. 1 (51). — Pp. 22–33. DOI: 10.1515/adms-2017-0002.
18. 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. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-54-64. — EDN FZQUIH.
19. 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. — Is. 1. — Pp. 17–22. DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-1-33-41.
20. 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: материалы конференции, Астрахань, 26–30 апреля 2021 года. — Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2021. — С. 857–862. — EDN UFKKXH.
21. 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. — EDN XAFIJI.
22. 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. 282–289. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-282-289. — EDN HOXLZE.

REFERENCES

1. Pustoshnyj, A. V., A. V. Sverchkov and S. P. Shevtsov “Vliyanie sherokhovatosti poverkhnosti grebnogo vinta na ego propulsivnye kharakteristiki.” *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* 4(390) (2019): 11–26. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-11-26.
2. Gao, G and Zh. Zhang. “Cavitation erosion mechanism of 2Cr13 stainless steel” *Wear*. 488–489 (2022): 204137. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204137.
3. Hattori, S., T. Itoh “Cavitation erosion resistance of plastics”. *Wear* 271(2011): 1103–1108. DOI:10.1016/j.wear.2011.05.012.
4. Yamatogi, T., H. Murayama, K. Uzawa, K. Kageyama and N. Watanabe “Study on cavitation erosion of composite materials for marine propeller”. *17th International Conference on Composite Materials*. Edinburgh, Scotland (2009):10.
5. Koivuluoto, H., A. Milanti, G. Bolelli, L. Lusvarghi, P. Vuoristo. “High-pressure cold sprayed Ni and Ni-Cu coatings: improved structures and corrosion properties”. *Journal of Thermal Spray TRechnology*. 23.1–2 (2014): 98–103. DOI: 10.1007/s11666-013-0016-7.
6. Jiang, X., N. Overman, C. Smith and K. Ross. “Microstructure, hardness and cavitation erosion resistance of different cold spray coatings on stainless steel 316 for hydropower applications” *Materials Today Communications*. 25 (2020): 1–27. DOI:10.1016/j.mtcomm.2020.101305.
7. Bray, M., A. Cockburn and W. O’Neil. “The laser-assisted cold spray process and deposit characterization”. *Surface and Coatings Technology*. 203 (2009): 2851–2857. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2009.02.135.
8. Tsvetkov, Y. N. *Kavitatsionnoye iznashivaniye metallov i oborudovaniya*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003.
9. Li X. Y. Cavitation erosion and corrosion behavior of copper–manganese–aluminum alloy weldment / X. Y. Li, Y. G. Yan, L. Ma, Z. M. Xu, J. G. Li // *Materials Science and Engineering A*. — 2004. — Vol. 382. — Pp. 82–89. DOI:10.1016/j.msea.2004.04.032.
10. Lu, X., Ch. Chen, K. Dong, Z. Li and J. Chen. “An equivalent method of jet impact loading from collapsing near-wall acoustic bubbles: A preliminary study”. *Ultrasonics Sonochemistry*. 79 (2021): 105760. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105760.
11. Ahmad, A. “Refurbishing damaged surfaces of nickelaluminum bronze propellers: A robotic approach using gas metal arc welding and friction stir processing”. *Proceedings of 8th International Conference on Advanced Materials Engineering and Technology (ICAMET 2020) AIP Conf. Proc.* 2347 (2021): 020156–1–020156–10. DOI: 10.1063/5.0053484.

12. Bakshi, D., Ch. Prakash, S. Singh, R. Kumar and D. Ashri. “A Detailed Study on Friction Stir Welding and Friction Stir Processing — A Review Paper”. *International Journal of Industrial Engineering and Technology* 4.1 (2014): 1–2.
13. Muñoz-Cubillos, J., J. J. Coronado and S. A. Rodríguez. “On the cavitation resistance of deep rolled surfaces of austenitic stainless steels”. *Wear* 428–429 (2019): 24–31. DOI: 10.1016/j.wear.2019.03.001.
14. Mesaa, D. H., C. M. Garzón and A. P. Tschiptschin. “Influence of cold-work on the cavitation erosion resistance and on the damage mechanisms in high-nitrogen austenitic stainless steels”. *Wear* 271 (2011): 1372–1377. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.063.
15. da Cruz, J. R., S. L. Henke and A. S. Climaco Monteiro d’Oliveir “Effect of Cold Work on Cavitation Resistance of an Austenitic Stainless Steel Coating”. *Materials Research*. 19.5 (2016): 1033–1041. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0442.
16. Chursova, L. V., N. N. Panina, T. A. Grebneva and I. Y Kutergina. *Epoksidniye smoly, otverditeli. Modifikatory i svyazuyushiye na ih osnove*. SPb.: TsOP “Professiya”, 2020.
17. Bolewski, Ł., M. Szkodo and M. Kmiec. “Cavitation erosion degradation of belzona coating”. *Advances in materials science* 17.1(51) (2017): 22–33. DOI: 10.1515/adms-2017-0002.
18. Tsvetkov, Y. N., Y. O. Fiaktistov and E. O. Gorbachenko. “Otsenka diametra struy vody, vozdeystviy shih na poverhnost’ lopastey grebnyh vintov pri kavitatsionnom iznashivani”. *Vestnik AGTU. Seriya: Morskaya tehnika i tehnologiya* 1 (2021): 54–64. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-54-64.
19. Tsvetkov, Y. N., E. O. Gorbachenko and Ya. O. Fiaktistov “Analysis of the Geometry of Dents on a Propeller Blade Surface during Cavitation Wear”. *Journal of Friction and Wear* 42.1 (2021): 17–22. DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-1-33-41.
20. Fiaktistov, Ya. O. and Yu. N. Tsvetkov Kavitatsionnaya iznosostojkost polimernykh sostavov s metallicheskim napolnitelem. Astrakhan: Astrakhanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2021: 857–862.
21. Fiaktistov, Y. O., Y. N. Tsvetkov and N. S. Zaytseva. “Mehanizn razrusheniya epoksidnyh kompozitov s metallicheskim poroshkovym napolnitelem pri kavitatsionnom vozdeystvii” *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.
22. Tsvetkov, Y. N., N. M. Vihrov and Y. O. Fiaktistov. “Vliyanie dobavki bronzovogo poroshka na adgeziyu epoksidnogo kompaunda k alyuminievoy bronzе” *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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор,
Государственный университет морского и речного
флота имени адмирала С. О. Макарова,
198035 Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7,
e-mail: yuritsvet@mail.ru
Баранов Сергей Геннадьевич —
старший преподаватель,
Государственный университет морского и речного
флота имени адмирала С. О. Макарова,
198035 Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7,
e-mail: baranovsg@gumrf.ru
Фиактистов Ярослав Олегович —
старший преподаватель,
Государственный университет морского и речного
флота имени адмирала С. О. Макарова,
198035 Санкт-Петербург, ул. Двинская, д. 5/7,
e-mail: yaroslav3373@mail.ru

Information about the authors

Tsvetkov Yuriy Nikolayevich —
doctor of science, professor,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping (SUMIS),
d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035, Russia.
e-mail: yuritsvet@mail.ru
Baranov Sergey Genadiyevich —
senior lecturer,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035, Russia.
e-mail: baranovsg@gumrf.ru
Fiaktistov Yaroslav Olegovich —
senior lecturer,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg, 198035, Russia.
e-mail: yaroslav3373@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 октября 2024 г.
Received: Oct. 9, 2024.