

УДК 532.64+57.022
DOI: 10.7868/S25000640190202

ИССЛЕДОВАНИЕ БИООБРАСТАНИЯ ПОЛИРОВАННОЙ И СУПЕРГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАЛИ МАРКИ А40S В УСЛОВИЯХ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА

© 2019 г. А.И. Уколов¹, Т.Н. Попова¹, А.В. Кулиш¹

Аннотация. Исследованы антиобрастающие свойства поверхности судостроительной стали марки А40S с супергидрофобным слоем в условиях Керченского пролива. Сравнительный анализ обрастания выполнен на полированных и естественных (после проката) частях образца.

На специально сконструированном держателе пластины размером $8 \times 90 \times 50$ мм были погружены в морскую воду на два месяца (август – сентябрь 2018 г.). Оптические наблюдения изменений качества поверхности и анализ биообрастания проведены через 24 и 55 дней нахождения образцов под водой. Погодные условия фиксировались ежедневно в одно и то же время в течение всего периода проведения эксперимента.

Результаты показали, что обрастание покрытия с низкой поверхностной энергией за счет явления абсолютного несмачивания заметно отличается от такового на полированной и естественной частях образца.

После нахождения под водой для частей со всеми способами обработки поверхности выявлены обрастатели следующих групп: усонogie ракообразные (Chthamalidae: *Chthamalus stellatus*), сидячие многощетинковые черви (Serpulidae: *Serpula vermicularis*), мшанки (Bryozoa), губки (Porifera) и зеленые водоросли (Chlorophyta). Плотность и размер обрастаний супергидрофобной поверхности меньше, чем полированной или естественной.

Основные проблемы широкого применения супергидрофобных поверхностей связаны с деградацией структуры супергидрофобного слоя под волновым воздействием. Поэтому дальнейшее развитие применения эффекта супергидрофобности в морских технологиях, в том числе использования супергидрофобных покрытий для защиты корпусов судов, направлено на увеличение прочностных характеристик микрорельефа поверхности для эксплуатации антиобрастающего слоя в течение экономически выгодного периода времени.

Ключевые слова: биообрастания, супергидрофобная поверхность, полированная поверхность, судостроительная сталь, явление полного несмачивания.

THE BIOFOULING OF POLISHED AND SUPERHYDROPHOBIC SURFACE OF A40S STEEL STUDY UNDER THE CONDITIONS OF THE KERCH STRAIT

A.I. Ukolov¹, T.N. Popova¹, A.V. Kulish¹

Abstract. In this work, the anti-fouling properties of the surface of the shipbuilding steel A40S with a super-hydrophobic layer under the conditions of the Kerch Strait are examined. A comparative analysis of fouling is performed on relatively polished and original (rolled) parts of the sample.

The plates were installed on a specially designed holder measuring $8 \times 90 \times 50$ mm and immersed into seawater. The duration of the experiment was two months, from August to September 2018. Optical observations of changes in surface quality and analysis of biofouling were carried out 24 and 55 days after the samples were placed under water. Weather conditions were recorded daily at the same time (12:00 p.m.) throughout the entire period of the experiment.

The results showed that fouling of the coating with low surface energy due to the phenomenon of absolute nonwetting differs markedly from the polished and original part of the sample.

¹ Керченский государственный морской технологический университет (Kerch State Maritime Technological University, Republic of Crimea, Russian Federation), Российская Федерация, 298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, e-mail: Ukolov_aleksei@mail.ru

After being under water, overgrowths of the following groups were found for parts processed by all methods of surface treatment: barnacles (Chthamalidae: Chthamalus stellatus), sessile polychaeta worms (Serpulidae: Serpula vermicularis), bryozoans (Bryozoa), sponges (Porifera) and green algae (Chlorophyta). The density and size of the fouling at superhydrophobic surface is less than that at polished or original ones.

The main problems of widespread use of superhydrophobic surfaces are associated with the degradation of the superhydrophobic layer structure under the wave effect. Therefore, the further development of the application of the superhydrophobic effect in marine technologies, including the use of superhydrophobic coatings to protect ship hulls, is aimed at increasing the strength characteristics of the surface microrelief for the operation of the anti-fouling layer during an economically advantageous period of time.

Keywords: biofouling, superhydrophobic surface, polished surface, shipbuilding steel, the phenomenon of complete nonwetting.

ВВЕДЕНИЕ

Гидротехнические сооружения и корпуса судов, постоянно находящиеся в морской или пресной воде, подвергаются различным обрастаниям, что является причиной коррозии и нарушения гидродинамических характеристик их поверхностей. При переходе плавающего средства из соленого водоема в пресный морские наросты с поверхности исчезают, и наоборот. После возвращения в первичный водоем колонии биообрастаний восстанавливаются с большей скоростью и плотностью, в результате чего возникают дополнительные проблемы с очисткой поверхности, а единственный способ, известный сегодня, это механическая обработка корпуса судна в доке.

Еще в XVIII веке было замечено, что находящиеся в морской воде поверхности меньше поддаются различного рода обрастаниям, если будут обработаны медью [1]. В наше время кроме меди используют и другие токсические вещества – биоциды, содержащие оловоорганические соединения, трибутилолово $[(C_4H_9)_3Sn]$, соединения цинка, ванадия, – одновременно представляющие экологическую опасность для водной среды, связанную с загрязнением, токсичностью, чем ограничивается потенциал их применения в ближайшей перспективе. Именно поэтому необходим поиск экологически чистых материалов и методов обработки поверхностей, способных противостоять морской коррозии и биологическим обрастаниям.

Одним из перспективных направлений борьбы с биообрастаниями является использование супергидрофобных покрытий [2–7], обладающих низкой поверхностной энергией.

Супергидрофобные поверхности – это искусственные микро- и наномасштабные иерархические

структуры, которые за счет явления несмачивания могут эффективно препятствовать биообрастанию.

Поведение жидкой капли на твердой поверхности определяется краевым углом (углом контакта) θ – углом между касательной в трехфазной точке и твердой поверхностью. Угол θ капли связан с межфазными энергиями, действующими между границами раздела твердое тело – жидкость (γ_{SL}), поверхностной энергией твердое тело – пар (γ_{SV}) и энергией жидкость – пар (γ_{LV}), соотношением:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что чем ниже поверхностная энергия γ_{SV} , тем больше краевой угол и меньше смачиваемость твердого тела. Если угол контакта $\theta < 90^\circ$, поверхность обладает гидрофильными свойствами, $\theta > 90^\circ$ соответствует гидрофобному взаимодействию. Увеличение краевого угла до значений $\theta > 150^\circ$ свидетельствует о переходе в состояние с низкой поверхностной энергией – супергидрофобное.

Актуальность и перспективность использования супергидрофобных свойств поверхностей привели к тому, что за последние 15 лет активного их изучения исследователями предложено много практических способов и методик создания супергидрофобных поверхностей [8]. В том числе нами в работах [9–12] подробно описаны методика осаждения супергидрофобного слоя из паровой фазы при помощи готовой суспензии и установка для анализа супергидрофобного состояния по измерениям краевого угла капли на поверхности образца судостроительной стали марки А40S. Изложенные в этих статьях результаты исследований привели к необходимости дальнейшего изучения динамики биообрастания и противообрастающих свойств образцов судостроительной стали марки А40S, по-

крытых супергидрофобным слоем, в естественных условиях морской среды (Керченского пролива), что и стало целью данной работы.

Цель определила задачу исследования: с помощью оптических и биологических методов выполнить сравнительный анализ обрастания полированной и супергидрофобной поверхностей после нахождения их в морской воде.

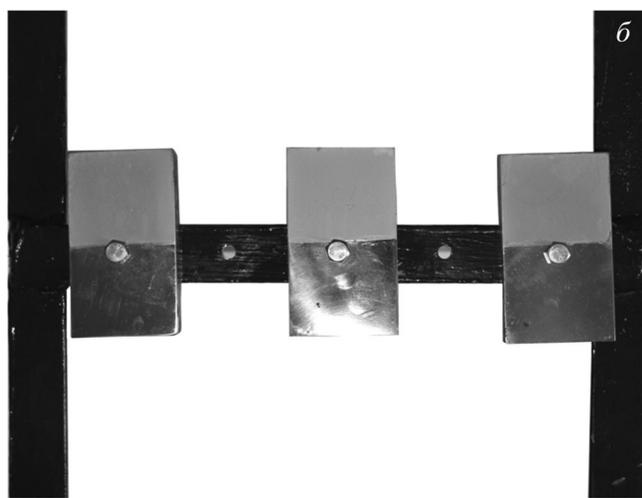
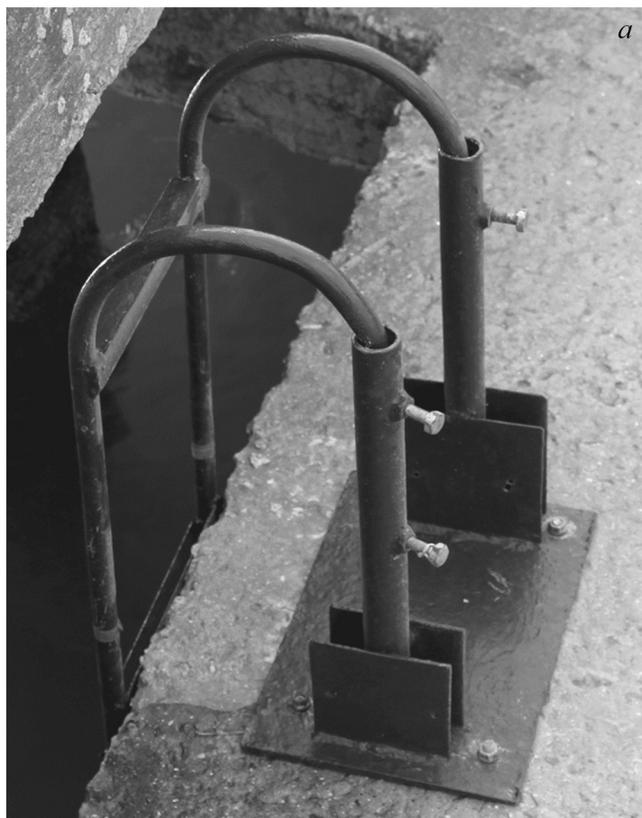


Рис. 1. Держатель образцов (а) и образцы полированные, верхняя половина которых покрыта супергидрофобным слоем (б).
Fig. 1. Sample holder (a) and polished specimens, the upper half of which is covered with super-hydrophobic layer (b).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для проведения эксперимента по исследованию динамики биообрастания в естественной среде была выбрана судостроительная сталь марки А40S, широко применяемая в морских технологиях. Использовались образцы размером $8 \times 90 \times 50$ мм. Поверхность образцов предварительно была отшлифована с уменьшением зернистости абразива. Финишная механическая полировка осуществлена раствором диоксида хрома Cr_2O_3 в чистом керосине до достижения зеркальной поверхности. Супергидрофобный слой был нанесен химическим осаждением из паровой фазы с помощью супергидрофобной системы NeverWet Base Coat на полированную поверхность образцов.

Эксперимент проводили в течение двух месяцев (август – сентябрь 2018 г.) в Керченском проливе на морской базе Керченского государственного морского технологического университета ($45^{\circ}16'15.0''$ с.ш., $36^{\circ}25'18.0''$ в.д.).

Образцы были закреплены на специальном держателе (рис. 1а), установленном на причале, и погружены в морскую воду 5 августа 2018 г. на глубину более 1 м. Одновременно было опущено под воду шесть образцов в два ряда. Расстояние между верхним и нижним рядами составляло 30 см. Одна сторона всех пластин была отполирована, а верхняя ее половина покрыта супергидрофобным слоем (рис. 1б). Обратная сторона оставалась необработанной (после проката). Результаты обрастания фиксировались в два этапа. Через 24 дня от начала эксперимента была выполнена фотосъемка всех образцов, а также изъят первый ряд образцов (3 шт.) для исследования его методом оптической микроскопии и взятия проб обрастаний на биологический анализ. Обработка проб биообрастаний и определение средней плотности каждого вида обрастателей на единицу площади поверхности были выполнены по общепринятой методике [13]. Относительная глубина повреждения поверхности от коррозии оценивалась оптически по разности хода микрометрического винта путем последовательной фокусировки объектива на участок неповрежденной поверхности и на дно дефектной поры. Площадь коррозировавшей поверхности определяли графически – нанесением миллиметровой сетки на изображение и подсчетом соотношения узлов, попавших в разрушенные и бездефектные области. Второй этап включал те же лабораторные процеду-

ры, только уже через 55 дней с оставшимися тремя образцами.

Погодные условия фиксировались ежедневно в одно и то же время (в 12:00) в течение всего периода проведения эксперимента. Температура воздуха (25,4–32,3 °С) и воды (23,9–26,4 °С) оставалась достаточно стабильной. Скорость ветра имела свой максимум 9–11 августа (10–12 м/с) при ее среднем значении 6,48 м/с в течение всего периода наблюдений. Соленость морской воды определялась цифровым солемером СТ-3090 и составляла 16–17 ‰.

Подробную информацию о составе слоя обрастания позволили получить исследования, выполненные при помощи стереомикроскопа Zoom SZM-45T2 и сопряженной с ним цифровой камеры Digital Camera for Microscope DCM130.

СРАВНЕНИЕ ОБРАСТАНИЙ ПОЛИРОВАННОЙ И СУПЕРГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОСЛЕ 24-ДНЕВНОГО НАХОЖДЕНИЯ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

На рисунке 2а представлен образец стали марки А40S, который был погружен 5 августа и снят 29 августа 2018 г. На образце отчетливо прослеживается граница между супергидрофобной (верхняя половина) и полированной поверхностями. Активная коррозия начинается именно на границе и направлена в сторону полированной поверхности.

В нижней, полированной, части (рис. 2а) наблюдаются два поколения личинок (разные возрастные группы) усоногих раков – балянусов (Chthamalidae: *Chthamalus stellatus* (Poli, 1791)). Особи распределены неравномерно по поверхности. Шесть более крупных, размером около 3 мм, образуют в центре, на границе с фронтом коррозии, плотную колонию (рис. 2а, б). Балянусы второго поколения, размером менее 1 мм (маленькие точки в нижней части рисунка 2а), разрозненно расположились на участках пластины, свободных от коррозии, но удаленных от ее краев. Вся поверхность, не пораженная ржавчиной, покрыта зелеными водорослями с высотой таллома 1–2 мм.

Верхняя часть образца с супергидрофобными свойствами (рис. 2а) покрыта зелеными водорослями. Плотность обрастания одинакова для супергидрофобного слоя и полированной поверхности, но на супергидрофобном покрытии водоросли характеризуются меньшей высотой таллома. Для оседания личинок животных и спор водорослей на новый

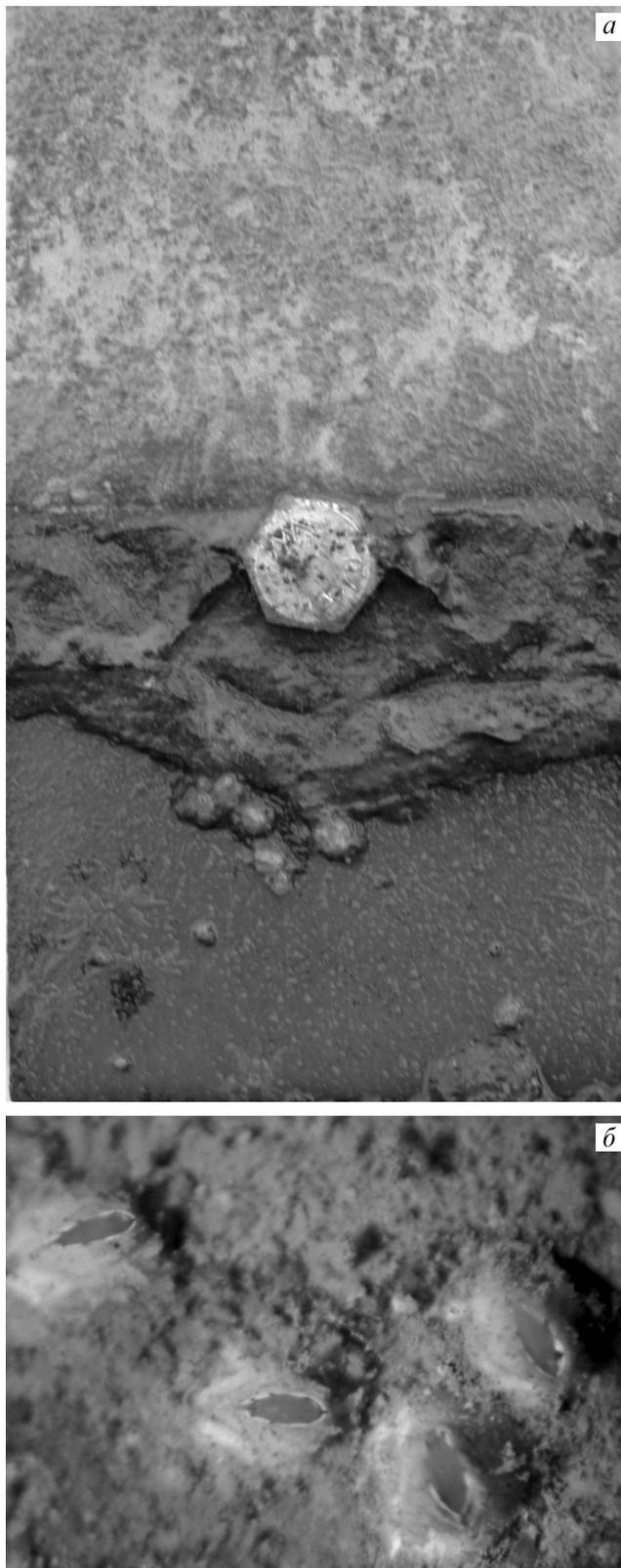


Рис. 2. Образец стали сразу после испытаний в морской воде в течение 24 дней (а) и микроструктура обрастания полированной поверхности (увеличение в 15 раз) (б).

Fig. 2. Steel sample immediately after testing in seawater for 24 days (a) and microstructure of polished surface fouling (magnification $\times 15$) (b).

субстрат необходимо формирование бактериальной пленки на его поверхности. Вероятно, бактериальный слой быстрее образуется на гидрофильной (естественной и полированной) поверхности, чем на супергидрофобной. Личинки (споры) обростателей взаимодействуют быстрее с поверхностями, имеющими большую поверхностную энергию, соответственно, оседают на них раньше, следовательно, обладают большим размером.

На супергидрофобной половине образца отсутствуют баянусы *Ch. stellatus*. С учетом того, что обрастание водорослями характеризуется значи-



Рис. 3. Полированный образец, верхняя часть которого покрыта супергидрофобным слоем, через 55 дней испытаний в морской воде.

Fig. 3. The polished sample, upper part of which is coated with a superhydrophobic layer after 55 days of testing in seawater.

тельной адгезией, чем и оказывает основное влияние на гидродинамику судна, можно судить о значительном преимуществе супергидрофобного покрытия.

СРАВНЕНИЕ ОБРАСТАНИЙ ПОЛИРОВАННОЙ И СУПЕРГИДРОФОБНОЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОСЛЕ 55-ДНЕВНОГО НАХОЖДЕНИЯ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

Образцы второй серии были погружены 5 августа и сняты 29 сентября 2018 г., с промежуточным наблюдением 29 августа. Концентрация и тип обростания после 24 дней испытаний соответствует таковому в первом ряду образцов (рис. 2а). Дальнейшее нахождение в морской среде и развитие обростания значительно меняет вид исследуемой поверхности (рис. 3).

Не защищенная супергидрофобным слоем половина образцов покрыта многочисленными сидячими многощетинковыми червями – серпулами (*Serpulidae*: *Serpula vermicularis* Linnaeus, 1767) – размером от 4–5 до 10–12 мм, с плотностью 1–2 особи на 1 см². Наблюдаются также единичные баянусы *Chthamalus stellatus*, появившиеся ранее (рис. 2а). Мшанки (*Bryozoa*) покрывают 100 % исследуемой поверхности, включая трубки серпул и домики баянусов. Поверхность делится на две условные части по наличию или отсутствию зеленых водорослей. В области, где водоросли хорошо развиты, высота их таллома не превышает 4 мм.

Полированная, нижняя, часть образца полностью коррозирована. Это заключение удалось сделать после постепенного смыва плотного слоя обростаний. Поверхность потеряла свое зеркальное состояние и покрылась дефектными порами из-за разрушения металла в приповерхностном слое. С появлением слоя обростаний изменился механизм коррозии металла (химическое или электрохимическое нарушение структуры стали). Типичный цвет гидроксида железа Fe(OH)₃ (ржавчина), который наблюдался после 24 дней испытаний (рис. 2а), сменился практически черным плотным образованием (рис. 3).

На супергидрофобной поверхности (рис. 3, верхняя часть) баянусы *Ch. stellatus* отсутствуют даже после 55 дней испытания. На супергидрофобной поверхности обнаружена одна особь серпулы *Serpula vermicularis* с длиной трубки 10 мм. При этом 90 % поверхности покрыто мшанками,

а также зелеными водорослями с размером таллома менее 1 мм. Следует отметить, что водоросли покрывают только зону, заполненную мшанками, используя их как субстрат для прикрепления. На участках без мшанок водоросли отсутствуют. Коррозия практически не наблюдается.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОБРАБОТАННОЙ (ПОСЛЕ ПРОКАТА) ПОВЕРХНОСТИ

Обратная сторона образцов оставалась необработанной (после проката), что позволило выполнить дополнительное сравнение обрастаний. На естественной поверхности после 24 дней испытания встречаются зеленые водоросли с более высоким талломом, чем на полированной или супергидрофобных поверхностях. Это связано с оптимальными условиями роста водорослей на гидрофильной поверхности и меньшей вероятностью их отрыва при волновом воздействии от поверхности с высокой поверхностной энергией.

Присутствуют обрастания баянусами *Chthamalus stellatus* первого поколения размером 6–10 мм и плотностью 0,5 экз./см² по всей поверхности образца. Имеются также единичные серпулы *Serpula vermicularis* длиной около 7 мм.

Через 55 дней нахождения образцов под водой на естественной поверхности (после проката) были найдены обрастатели всех указанных выше групп: усонogie ракообразные *Ch. stellatus*, сидячие многощетинковые черви *S. vermicularis*, мшанки (Bryozoa) и губки (Porifera). При этом плотность обрастаний больше, чем на обработанных поверхностях.

При количественной оценке динамики обрастания, выраженной относительным изменением средней плотности биообрастаний на единицу площади, за нулевой уровень принято начальное состояние поверхности. По мере нахождения образцов под водой увеличивались площадь и толщина слоя обрастания вплоть до максимального значения, принятого за 100 %. Структурная деградация, вызванная коррозией на образцах, рассчитана по соотношению площадей разрушенной поверхности и сохранившейся после обработки. На рисунке 4 показано процентное сопоставление качества поверхностей после двух этапов эксперимента. Относительная глубина повреждения вследствие коррозии составила 0,5–0,7 % (0,040–0,056 мм) для образцов, находившихся под водой 24 дня, и 1,8–2 % (0,144–0,160 мм) через 55 дней эксперимента.

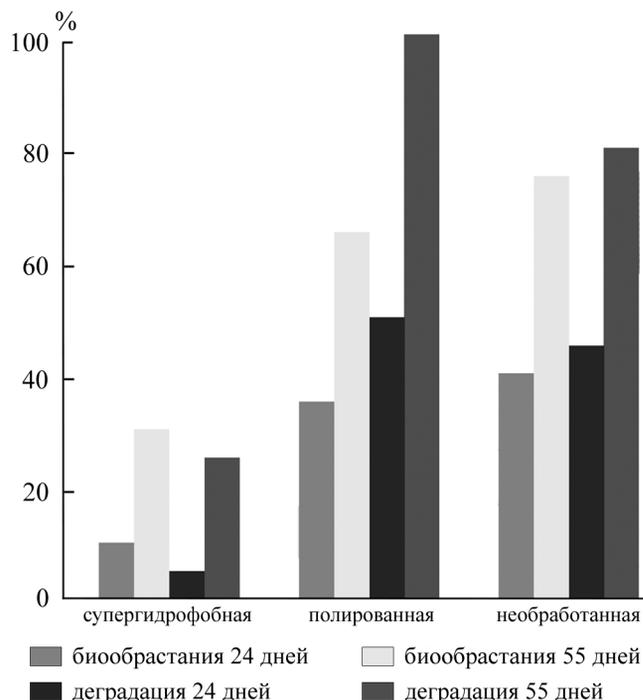


Рис. 4. Динамика биообрастания и деградации супергидрофобной, полированной и необработанной (после проката) поверхностей через 24 и 55 дней испытаний в морской среде.

Fig. 4. Dynamics of biofouling and degradation of superhydrophobic, polished and untreated (after rolling) surfaces after 24 and 55 days of testing in the marine environment.

Полированная поверхность хуже сопротивляется коррозии вследствие прямого контакта атомов железа с морской водой. Супергидрофобный слой успешно защищает металл от разрушения практически до потери свойств абсолютного несмачивания и собственного износа под волновым воздействием. Необработанная поверхность, с одной стороны, уже на начальном этапе испытания имеет определенную степень дефектности, которая снижает активность реакции окисления железа. С другой стороны, грубая шероховатость после проката способствует лучшему прикреплению обрастателей и их росту до более крупных размеров.

Для гладкой полированной поверхности наблюдается определенный период, по истечении которого возникают первые поселения прикрепленных живых существ, создающих подложку для следующего слоя обрастания. Для супергидрофобного покрытия благодаря газовому зазору между твердой поверхностью и жидкостью наблюдаемый интервал времени значительно больше. Однако неизвестно, насколько длительным может быть этот интервал, если слой сохранит состояние абсолютного несмачивания.

Продолжительность структурного совершенства супергидрофобной поверхности зависит от состава и гидродинамики потоков воды, воздействующих на образцы. Эти параметры, в свою очередь, во многом зависят от погодных условий, при которых выполняется эксперимент. В нашем случае наличие штормового ветра на начальном этапе исследования нарушило необходимую шероховатость слоя и значительно ухудшило его супергидрофобные показатели как антиобрастающей поверхности. Однако и при таких условиях используемые супергидрофобные покрытия показали заметное отличие в сравнении с незащищенной частью образца.

ВЫВОДЫ

В работе показаны и обсуждены результаты исследования биообрастаний гидрофильной (полированной, естественной) и покрытой супергидрофобным слоем поверхностей судостроительной стали марки А40S в летне-осенний период в естественных условиях Керченского пролива.

Сравнительный анализ частей образцов с различной обработкой показал заметные преимущества супергидрофобных поверхностей. Максимально деградируют гидрофильные поверхности – полированные и необработанные (после проката), причем необработанные (после проката) поверхности подвержены наибольшей степени обрастания.

Качественный и количественный состав обрастания зависит от многих физических, химических и биологических факторов. Поэтому одно-

значно нельзя определить срок службы покрытий, использующих эффект абсолютного несмачивания, для различных условий эксперимента. Кроме того, супергидрофобность поверхности не исчезает мгновенно. Это постепенный процесс потери необходимой структурированности, а следовательно, и увеличения поверхностной энергии и уменьшения краевого угла.

При наличии супергидрофобного состояния поверхности стали газовый зазор между твердым телом и жидкостью эффективно препятствует созданию бактериальной пленки и появлению первых обрастателей. Данные наблюдения подтверждают этот факт, что указывает на перспективность применения супергидрофобных покрытий для защиты материала, используемого в морской воде, от разрушения и биообрастания.

Основные проблемы широкого применения супергидрофобных покрытий связаны с деградацией их структуры под воздействием волн и естественных абразивных частиц (песка и других примесей), присутствующих в морской воде. Поэтому дальнейшее развитие применения эффекта супергидрофобности в морских технологиях направлено на увеличение прочностных характеристик микрорельефа поверхности для эксплуатации антиобрастающего слоя в течение экономически выгодного периода времени.

Исследование поддержано Керченским государственным морским технологическим университетом по контракту № АААА-А18-118021990017-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Е.С., Искра Е.В., Куцевалова Е.П. 2000. *Защита морских судов от обрастания*. Л., Судостроение: 200 с.
2. Sun K., Yang H., Xue W., He A., Zhu D., Liu W., Adeyemi K., Cao Y. 2018. Anti-biofouling superhydrophobic surface fabricated by picosecond laser texturing of stainless steel. *Applied Surface Science*. 436: 263–267. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.12.012
3. Zhang B., Li J., Zhao X., Hu X., Yang L., Wang N., Li Y., Hou B. 2016. Biomimetic one step fabrication of manganese stearate superhydrophobic surface as an efficient barrier against marine corrosion and *Chlorella vulgaris*-induced biofouling. *Chemical Engineering Journal*. 306: 441–451. doi: 10.1016/j.cej.2016.07.062
4. Ferrari M., Benedetti A., Santini E., Ravera F., Liggieri L., Guzman E., Cirisano F. 2015. Biofouling control by superhydrophobic surfaces in shallow euphotic seawater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 480: 369–375. doi: 10.1016/j.colsurfa.2014.11.009
5. Ferrari M., Benedetti A. 2015. Superhydrophobic surfaces for applications in seawater. *Advances in Colloid and Interface Science*. 222: 291–304. doi: 10.1016/j.cis.2015.01.005
6. Samaha M.A., Tafreshi H.V., Gad-el-Hak M. 2012. Superhydrophobic surfaces: From the lotus leaf to the submarine. *Comptes Rendus Mecanique*. 340(1–2): 18–34. doi: 10.1016/j.crme.2011.11.002
7. Ouyang Y., Zhao J., Qiu R., Hu S., Zhang Y., Wang P. 2018. Bioinspired superhydrophobic and oil-infused surface: Which is the better choice to prevent marine biofouling? *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 559: 297–304. doi: 10.1016/j.colsurfa.2018.09.060
8. Придворов Б.Н., Попова Т.Н., Уколов А.И. 2017. Супергидрофобные поверхности. Обзор. В кн.: *Образование, наука и молодежь – 2017. Часть 2 (Керчь, 26 октября 2017 г.)*. Керчь, изд-во ФГБОУ ВО КГМУ: 107–120.
9. Popova T., Ukolov A. 2018. Studying of the Seawater Drops Properties on Superhydrophobic Surface. In: *Quality and Reliability of Technical Systems: Theory and Practice. Vol. 2*. Vilnius: JVE International Ltd.: 198–212.

10. Старовойтов П.П., Шишкин И.С., Уколов А.И., Попова Т.Н., 2018. Методика создания супергидрофобного слоя на поверхности судостроительной стали марки А40S. В кн.: *Образование, наука и молодежь – 2018 (Керчь, 2–13 апреля 2018 г.)*. Керчь, изд-во ФГБОУ ВО КГМТУ: 173–177.
11. Уколов А.И., Попова Т.Н. 2018. Исследование краевого угла капли морской воды при испарении на супергидрофобной поверхности стали А40S. *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. 15(2): 102–107. doi: 10.31429/vestnik-15-2-102-107
12. Уколов А.И., Попова Т.Н. 2018. Исследование супергидрофобного состояния структурированной поверхности судостроительной стали при контакте с морской водой. В кн.: *Биологическое разнообразие: изучение, сохранение, восстановление, рациональное использование: материалы Международной научно-практической конференции (Керчь, 19–23 сентября 2018 г.)*. Симферополь, АРИАЛ: 418–424.
13. *Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем*. 1992. СПб., Гидрометеиздат: 319 с.
6. Samaha M.A., Tafreshi H.V., Gad-el-Hak M. 2012. Superhydrophobic surfaces: From the lotus leaf to the submarine. *Comptes Rendus Mecanique*. 340(1–2): 18–34. doi: 10.1016/j.crme.2011.11.002
7. Ouyang Y., Zhao J., Qiu R., Hu S., Zhang Y., Wang P. 2018. Bioinspired superhydrophobic and oil-infused surface: Which is the better choice to prevent marine biofouling? *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 559: 297–304. doi: 10.1016/j.colsurfa.2018.09.060
8. Pridvorov B.N., Popova T.N., Ukolov A.I. 2017. [Superhydrophobic surfaces. Review]. In: *Образование, наука и молодежь – 2017. Част' 2. [Education, Science and Youth – 2017. Part 2 (Kerch, Russia, 26 October 2017)]*. Kerch, Kerch State Maritime Technological University: 107–120. (In Russian).
9. Popova T., Ukolov A. 2018. Studying of the Seawater Drops Properties on Superhydrophobic Surface. In: *Quality and Reliability of Technical Systems: Theory and Practice. Vol. 2*. Vilnius: JVE International Ltd.: 198–212.

REFERENCES

1. Gurevich E.S., Iskra E.V., Kutsevalova E.P. 2000. *Zashchita morskikh sudov ot obrastaniya. [Protection of ships against fouling]*. Leningrad, Sudostroenie: 200 p. (In Russian).
2. Sun K., Yang H., Xue W., He A., Zhu D., Liu W., Adeyemi K., Cao Y. 2018. Anti-biofouling superhydrophobic surface fabricated by picosecond laser texturing of stainless steel. *Applied Surface Science*. 436: 263–267. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.12.012
3. Zhang B., Li J., Zhao X., Hu X., Yang L., Wang N., Li Y., Hou B. 2016. Biomimetic one step fabrication of manganese stearate superhydrophobic surface as an efficient barrier against marine corrosion and *Chlorella vulgaris*-induced biofouling. *Chemical Engineering Journal*. 306: 441–451. doi: 10.1016/j.cej.2016.07.062
4. Ferrari M., Benedetti A., Santini E., Ravera F., Liggieri L., Guzman E., Cirisano F. 2015. Biofouling control by superhydrophobic surfaces in shallow euphotic seawater. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 480: 369–375. doi: 10.1016/j.colsurfa.2014.11.009
5. Ferrari M., Benedetti A. 2015. Superhydrophobic surfaces for applications in seawater. *Advances in Colloid and Interface Science*. 222: 291–304. doi: 10.1016/j.cis.2015.01.005
10. Starovojtov P.P., Shishkin I.S., Ukolov A.I., Popova T.N. 2018. [Superhydrophobic layer creating method on a shipbuilding steel grade А40S surface]. In: *Образование, наука и молодежь – 2018. [Education, Science and Youth – 2018 (Kerch, Russia, 2–13 April 2018)]*. Kerch, Kerch State Maritime Technological University: 173–177. (In Russian).
11. Ukolov A.I., Popova T.N. 2018. [The contact angle of a seawater drops on a superhydrophobic surface of steel А40S during evaporation research]. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*. 15(2): 102–107. (In Russian). doi: 10.31429/vestnik-15-2-102-107
12. Ukolov A.I., Popova T.N. 2018. [Study of superhydrophobic state of structured surface of shipbuilding steel by contact with marine water]. In: *Biologicheskoe raznoobrazie: izuchenie, sokhranenie, vosstanovlenie, ratsional'noe ispol'zovanie: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. [Biological diversity: the study, preservation, restoration, rational use: materials of the International Scientific and Practical Conference (Kerch, Russia, 19–23 September 2018)]*. Simferopol, АРИАЛ: 418–424. (In Russian).
13. *Rukovodstvo po gidrubiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem. [Guidance on hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems]*. 1992. St Petersburg, Gidrometeoizdat: 319 p. (In Russian).

Поступила 01.02.2019