

А.К. ЦВЕТНИКОВ, Л.А. МАТВЕЕНКО, Д.В. МАШТАЛЯР,
В.С. ЕГОРКИН, А.В. ГОЛУБ, С.И. МАСЛЕННИКОВ,
А.Д. ПАВЛОВ, С.В. ГНЕДЕНКОВ

Функциональные материалы и покрытия на основе нанодисперсного политетрафторэтилена различных температурных фракций

Изучено влияние физических и морфологических свойств, молекулярного и фракционного состава нанодисперсного политетрафторэтилена (НПТФЭ) FORUMTM на антифрикционные, противоизносные, гидрофобные, противоположающие и антиобледенительные свойства некоторых лакокрасочных материалов. Показаны результаты испытаний стальных поверхностей и лакокрасочных материалов (ЛКМ) с нанесенным сухим нанодисперсным ПТФЭ, а также НПТФЭ в составе ЛКМ.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, нанопленки, композиты, покрытия, лакокрасочные материалы.

Functional materials and coatings based on nanodispersed polytetrafluoroethylene of different temperature fractions. A.K. TSVETNIKOV, L.A. MATVEENKO, D.V. MASHTALYAR, V.S. EGORKIN, A.V. GOLUB (Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok), S.I. MASLENNIKOV (National Research Centre for Marine Biology, FEB RAS, Vladivostok), A.D. PAVLOV, S.V. GNEDENKOV (Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok).

The influence of physical and morphological properties, molecular and fractional composition of nanodispersed polytetrafluoroethylene (NDPTFE) FORUMTM on antifriction, anti-wear, hydrophobic, anti-fouling and anti-icing characteristics of some paint coatings was studied. The article shows the test results for steel surfaces and paint materials with the dry nanodispersed PTFE applied to their surfaces, as well as the test results for NDPTFE as the component of paint coatings.

Key words: polytetrafluoroethylene, nanofilms, composites, coatings, paint materials.

Введение

Уникальные физико-химические и эксплуатационные свойства политетрафторэтилена (ПТФЭ, товарное название в России «фторопласт-4»), который занесен в Книгу

*ЦВЕТНИКОВ Александр Константинович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, МАТВЕЕНКО Людмила Александровна – ведущий инженер-технолог, МАШТАЛЯР Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ЕГОРКИН Владимир Сергеевич – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, ГОЛУБ Андрей Владимирович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, ПАВЛОВ Алексей Дмитриевич – ведущий инженер, ГНЕДЕНКОВ Сергей Васильевич – член-корреспондент РАН, директор (Институт химии ДВО РАН, Владивосток), МАСЛЕННИКОВ Сергей Иванович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник (Национальный научный центр морской биологии ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: tsvetnikov@ich.dvo.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток» на 2018–2020 годы (проект 18-3-039). Трибологические испытания и измерения углов смачивания осуществлены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-33-00009).

рекордов Гиннеса как самый скользкий материал, его высокая термостойкость, исключительная химическая стойкость и биологическая инертность делают его незаменимым и востребованным материалом [3], на что указывает самый большой ежегодный прирост объемов производства среди фторорганических соединений. Помимо наращивания производства блочного ПТФЭ ведутся работы по созданию новых технологий измельчения ПТФЭ до микронных размеров. Тем не менее ряд недостатков ПТФЭ (низкие адгезия и пластичность) такими способами не устраняются. В Институте химии ДВО РАН в 1982 г. в процессе разработки термоградиентных методов синтеза фторидов элементов, в том числе углерода [5], впервые было обнаружено явление переноса тяжелых молекул полимера в газовую фазу в процессе термодеструкции ПТФЭ с последующей гомофазной нуклеацией и конденсацией в виде нанопленок толщиной 2–10 нм. Изучение процесса термодеструкции ПТФЭ (фторопласта-4) привело к созданию термогазодинамического метода и технологии получения НПТФЭ. Данный продукт имеет зарегистрированный в РФ товарный знак ФОРУМ®. В качестве исходного сырья могут быть использованы все виды фторопласта-4, включая композиты и отходы (рис. 1а), которых в мире образуется около 100 тыс. т в год. Продукция на основе НПТФЭ находит применение во всех сферах человеческой деятельности [6].

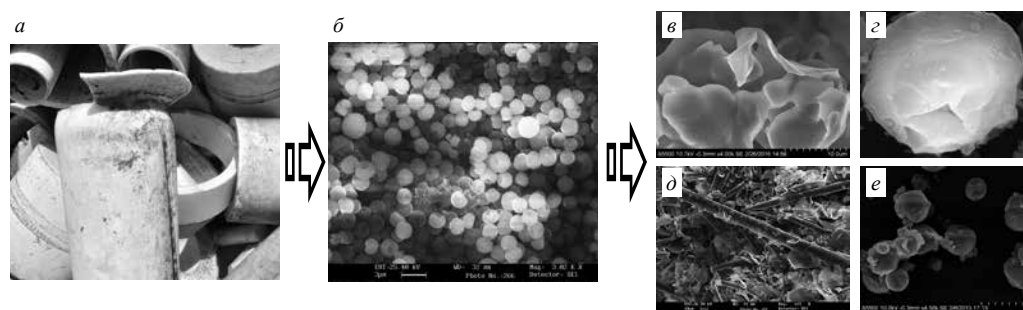


Рис. 1. Фторопласт-4, или ПТФЭ: отходы (а), нанодисперсный порошок (б), нанопленка в составе низкотемпературной фракции ПТФЭ (в), микросфера (z), микротрубка (д), микрочастицы высокотемпературной фракции (е)

В зависимости от условий конденсации нанопленки могут вырастать до 2×2 мкм с последующим образованием микросфер в составе порошка (рис. 1б), до размеров 100×100 мкм (рис. 1в) и сворачиваться в микротрубки длиной до 150 мкм (рис. 1д). Микросфера НПТФЭ (рис. 1z) состоит из пакета нанопленок. Высокотемпературные фракции имеют в своем составе частицы размером около 5 мкм (рис. 1е). При небольшом механическом усилии частицы порошка НПТФЭ легко распадаются на нанопленки, которые благодаря наноэффекту легко налипают и прочно удерживаются на любой твердой поверхности и распределяются в объеме полимера, а также в лакокрасочных материалах (ЛКМ).

С целью расширения областей применения НПТФЭ и улучшения характеристик ЛКМ нами было проведено изучение влияния добавки порошка НПТФЭ и его фракций в чистом виде для создания сплошного покрытия на поверхности металла, ЛКМ (железный сурик МА-15, судовая эмаль ПФ-167, противообрастающие краски SEAFORCE 30 и CUMIXAN ESO) для подводной части морских судов. Одновременно изучалось влияние частиц НПТФЭ на свойства ЛКМ при их введении в состав ЛКМ-композиции.

Экспериментальная часть

Для исследования возможности повышения противозносных, гидрофобных, антифрикционных, противообрастающих, антиобледенительных свойств поверхностей НПТФЭ наносили на отвержденные лакокрасочные покрытия из железного сурика

МА-15, судовой эмали ПФ-167 и противообрастающей краски SeaForce 30 на металле механическим натиранием х/б тканью сухого порошка НПТФЭ и на предварительно обезжиренные и зачищенные от ржавчины пластины из стали Ст-3. Параллельно проводили изучение ЛКМ-покрытий на основе железного сурика МА-15, судовой эмали ПФ-167 и противообрастающей краски SeaForce 30 с добавлением 10 % по сухому остатку порошка НПТФЭ ФОРУМ™. Для достижения максимальной дисперсности частиц НПТФЭ в ЛКМ порошок НПТФЭ предварительно диспергировали в уайт-спирите или ксилоле в специальном кавитаторе-диспергаторе. Перед применением полученную суспензию добавляли в ЛКМ в необходимом соотношении.

С целью определения влияния молекулярного веса ПТФЭ в составе НПТФЭ на свойства чистых ПТФЭ-покрытий на металле и красках, а также в составе ЛКМ

изучались низкомолекулярные и высокомолекулярные фракции ФОРУМ-3, ФОРУМ-4. Фракции выделялись из исходного НПТФЭ методом возгонки при различных температурах. Анализ смесей проводили на хромато-масс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP2010, оснащенный пиролизером PY-2020iD. Образцы ПТФЭ массой ~0,1 мкг вводили в камеру пиролизера в специальных одноразовых капсулах, 30 с выдерживали при 50 °С, затем нагревали до 500 °С со скоростью 100 °С/мин, выдерживали 3 мин. Разделение продуктов возгонки ПТФЭ проводили на капиллярной колонке Ultra ALLOY-5 (длина 30 м, внутренний диаметр 0,25 мм, толщина пленки 0,25 мкм) при программировании температуры от 40 (3 мин) до 320 °С, скорость подъема температуры 20 °С/мин, газ-носитель – гелий, 1 мл/мин. Температура инжектора 300 °С, делитель потока 1 : 100. Температура интерфейса и ионного источника 250 °С, напряжение на детекторе 1,1 кВ. Для идентификации компонентов образцов использовались библиотеки масс-спектров Wiley 8 и NIST 08/08s. Результаты хроматографического анализа фракций ФОРУМ-2, ФОРУМ-3 и ФОРУМ-4 приведены на рис. 2. Из данных анализа следует, что в легкой фракции НПТФЭ ФОРУМ-2 наибольшее количество молекул имеют химическую формулу $CF_3(CF_2)_{13}CF_3$, в НПТФЭ ФОРУМ-3 – $CF_3(CF_2)_{20}CF_3$, а в тяжелой фракции ФОРУМ-4 преобладают молекулы $CF_3(CF_2)_{50}CF_3$.

Трибологические испытания покрытий, полученных методом натирания ФОРУМ, ФОРУМ-3,

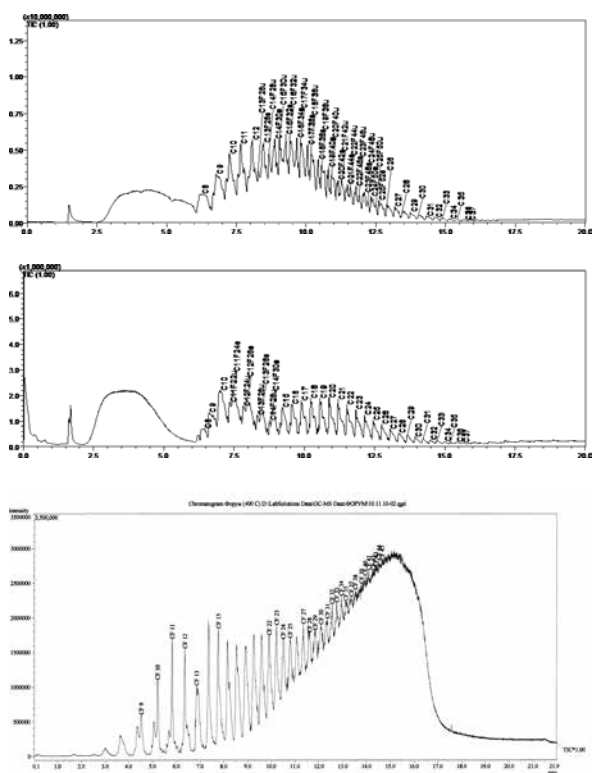


Рис. 2. Результаты хроматографического анализа фракций ФОРУМ-2 (а), ФОРУМ-3 (б) и ФОРУМ-4 (в)

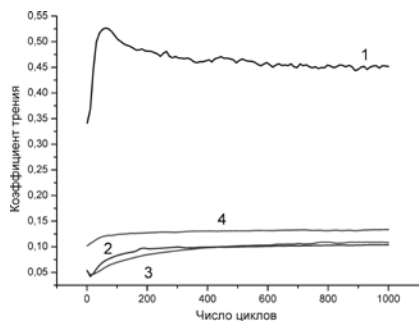


Рис. 3. Коэффициент трения пары стальной шар – Ст-3 без покрытия (1), с покрытием ФОРУМ-3 (2), с покрытием ФОРУМ-4 (3), с покрытием ФОРУМ (4)

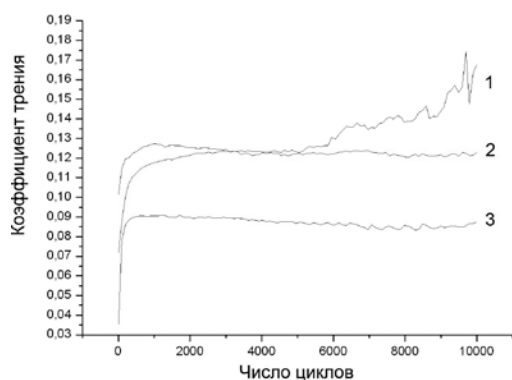


Рис. 4. Коэффициент трения пары стальной шар – Ст-3 с покрытием: ФОРУМ (1), ФОРУМ-3 (2), ФОРУМ-4 (3)

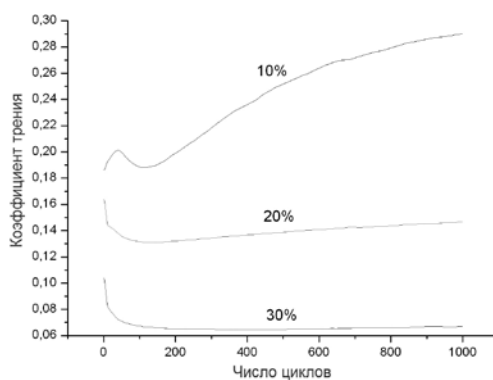


Рис. 5. Влияние добавки ФОРУМ (%) в судовую эмаль ПФ-167 на коэффициент трения пары стальной шар – испытываемый образец

ФОРУМ-4 на поверхности стали Ст-3 (рис. 3), проводили на автоматизированной машине трения Revetest (CSM Instruments, Швейцария) по схеме испытания «шарик–диск». В качестве контртела был выбран стальной шар (100Ст6) диаметром 10 мм. Все исследования проводили в режиме сухого трения на воздухе при температуре 25 °С и нагрузке 1 Н. Линейная скорость вращения была равна 50 мм/с, диаметр трека составлял 10 мм. Количество циклов вращения – 1000 оборотов для каждого образца. На рис. 4 показана сохранность НПТФЭ-покрытия на поверхности в зависимости от количества циклов. Влияние концентрации ФОРУМ в ЛКМ на коэффициент трения на примере судовой эмали ПФ-167 показано на рис. 5. Износ статического партнера (контртела) в данном исследовании не был обнаружен и при расчете не учитывался.

Для измерения углов смачивания применили метод цифровой обработки видеоизображения сидящей капли тестовой жидкости на исследуемой поверхности с использованием уравнения Юнга–Лапласа. Получали оптические изображения сидящей капли и обрабатывали их на установке Kruss DSA100 с программным обеспечением Advance. Капли тестовой жидкости (деионизированная вода с удельным сопротивлением 18 МОм · см и водные растворы NaCl различной концентрации) объемом 4 мкл наносили на натертую НПТФЭ поверхность образца из стали:

Тестовая жидкость	Начальный контактный угол, °
Деионизированная вода	117 ± 2
Водный раствор NaCl, г/л:	
0,1	118 ± 3
0,5	118 ± 1
1,0	118 ± 2
5,0	119 ± 2
10,0	120 ± 2
20,0	122 ± 1

Начальные краевые углы измеряли в 9 различных точках на поверхности каждого образца с как минимум пятью последовательными изображениями капли, сделанными в каждой точке. Воспроизводимость измерений краевых углов оценивали по среднеквадратическому отклонению, которое для 5 изображений одной и той же капли не превышало 0,5° на всех образцах. В то же время дисперсия значений краевых углов, измеренных на различных точках одного и того же образца, может достигать нескольких градусов, что отражает гетерогенность поверхности образца как по химическому составу, так и по значениям параметра шероховатости.

Прочность сцепления льда с покрытием связана с поверхностной энергией материала и соответственно с критическим поверхностным натяжением. Для проведения испытаний на прочность сцепления льда с исследуемой поверхностью использовали стальной конус, погруженный в воду, находящуюся в стальном цилиндре, футерованном резиной. На поверхность конуса наносили покрытие, после его отверждения конус опускали в цилиндр с деионизированной водой и замораживали до $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ в термошкафе Shimadzu thermostatic chamber TCE-N300-CE + 125 mm, установленном на разрывной машине Shimadzu autograph AG-X plus 50 kN. Замораживали в течение 1 ч, после чего проводили эксперимент по установлению усилия, необходимого для отрыва конуса от льда. Усредненные данные для покрытия НППФЭ и различных растворов NaCl см. на рис. 6 и в таблице.

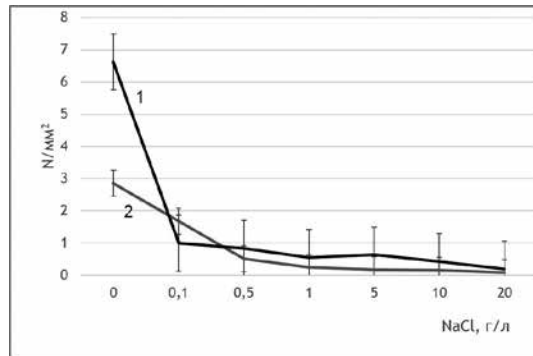


Рис. 6. Усилие отрыва льда от судовой эмали ПФ-167 (1) и НППФЭ ФОРУМ (2)

Значения контактных углов капли деионизированной воды и удельной нагрузки отрыва от льда испытываемых образцов НППФЭ-покрытий

№ образца, характер его покрытия	Контактный угол, град	Сила отрыва льда, Н
1. ФОРУМ™ на Ст-3	122 ± 3	2,0 ± 0,2
2. Сурик МА-15	87 ± 2	182 ± 17
3. Противообрастающая краска SeaForce 30	87 ± 4	132 ± 15
4. ФОРУМ™ на сурике МА-15	117 ± 1	3,0 ± 0,3
5. ФОРУМ™ на противообрастающей краске SeaForce 30	118 ± 2	2,0 ± 0,2
6. Сурик МА-15 + ФОРУМ™	95 ± 2	71 ± 6
7. Противообрастающая краска SeaForce 30 + ФОРУМ™	81 ± 5	64 ± 5
9. ФОРУМ-3 на Ст-3	118 ± 1	2,0 ± 0,2
10. ФОРУМ-4 на Ст-3	122 ± 5	1,5 ± 0,1
11. Сталь Ст-3	32 ± 5	312 ± 35

Влияние НППФЭ на противообрастающий эффект различных ЛКМ при покраске подводной части морских судов определяли в естественных условиях, для чего экспериментальные пластины из стали Ст-3 размерами 20 × 20 см были помещены на экспозицию в морскую воду 27.04.2016 г. на акватории бухты Тихая Заводь (зал. Восток зал. Петра Великого, Японское море). Пластины экспонировали (пирс МБС «Запад» ННЦМБ ДВО РАН) на глубине 0,5–1 м в течение 6 мес. Для проведения предварительного наблюдения за обрастанием (визуального осмотра) пластины вынимали на 5–15 мин на пирс, после чего производили макросъемку камерой Sony Alpha A5100. В дальнейшем фото пластин просматривали на экране ПК с максимальным цифровым увеличением. На рис. 7 представлены стальные пластины с различными покрытиями после 6 мес. пребывания в морской воде.

С целью установить, как влияет состояние поверхности подводной части судов на гидросопротивление и гидрофобность, сделана оценка силы трения вращающихся дисков. Испытания были проведены в глубоководном опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр» на экспериментальной установке НЗ9, предназначенной для испытаний моделей гребных винтов в свободной воде. Поперечные размеры бассейна

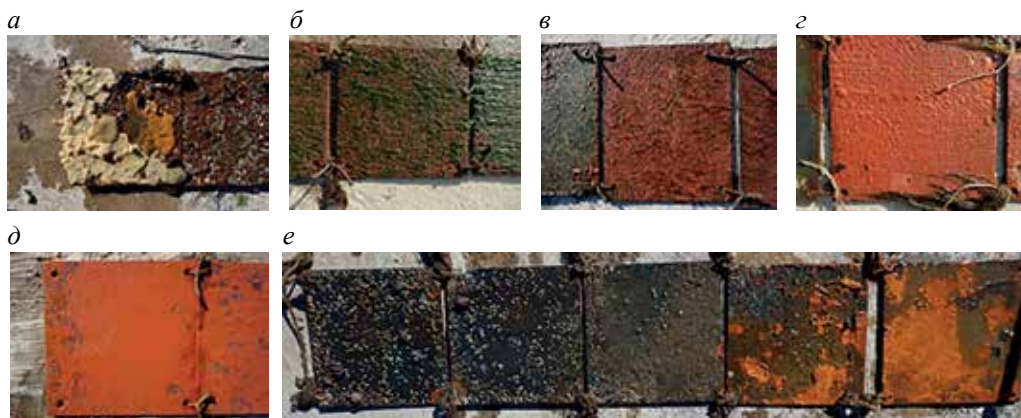


Рис. 7. Обрастание в морской среде за 6 мес. стальных пластин, окрашенных без грунтовки: *a* – сурик МА-15 без обработки; *б* – SeaForce 30; *в* – SeaForce 30 + 10 % ФОРУМ; *г* – сурик МА-15 с обработкой ФОРУМ; *д* – SeaForce 30 натерта ФОРУМ; *е* – CUMIXAN ECO (слева направо): без покрытия ФОРУМ, + 5 % ФОРУМ, + 10 % ФОРУМ, + 20 % ФОРУМ, + 30 % ФОРУМ

(ширина 15 м, глубина 7 м) полностью исключают влияние дна и стенок на результаты измерений.

Экспериментальная установка Н39 производства английской компании Cussons Technology Ltd обеспечивает измерение момента сопротивления до $50 \text{ Н} \times \text{м}$. Вал приводится во вращение сервомотором мощностью 18 кВт со скоростью от 30 до 3000 об/мин (от 0,5 до 50 об/с). Максимальное заглубление оси винтового динамометра составляет 0,920 м от поверхности воды. Стенд и динамометр с установленным диском представлены на рис. 8.

При исследовании сил трения на вращающихся дисках необходимо учитывать очень высокие окружные скорости, особенно вблизи наибольших радиусов. При принятом для

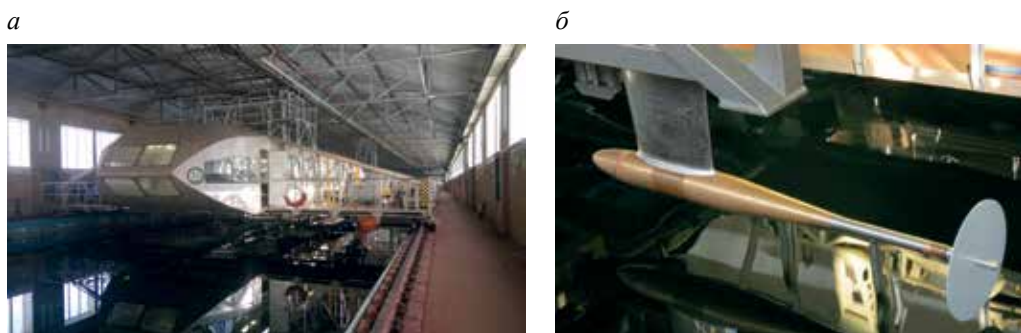


Рис. 8. Испытательный стенд (*a*) и установка Н39 для испытаний моделей гребных винтов в свободной воде с установленным диском (*б*)

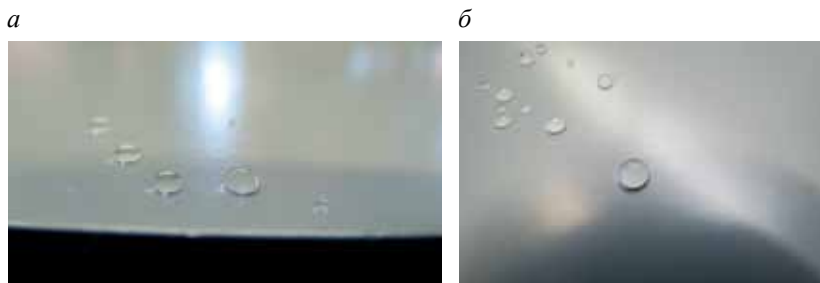


Рис. 9. Капли воды на поверхности диска с гидрофобным покрытием НПТФЭ ФОРУМ (*a* – до испытаний, *б* – после испытаний)



Рис. 10. Большой ракетный катер проекта 1241

опытов диаметре диска, равном 0,34 м, скорости на максимальном радиусе 0,17 м достигают значений 48 м/с (более 93 узлов). На поверхность диска, покрытую полиэфирной краской, НПТФЭ ФОРУМ был нанесен методом натирания (рис. 9). Испытания показали, что гидрофобное покрытие, полученное методом простого натирания порошком НПТФЭ ФОРУМ, сохраняется на поверхности после вращения диска в воде на линейных скоростях до 93 узлов (172 км/ч).

Проведены контрольные испытания объекта, покрашенного краской с добавками на основе НПТФЭ ФОРУМ для лакокрасочных материалов. Объектом испытаний выбран большой ракетный катер проекта 1241 (ТОФ), представленный на рис. 10. Его корпус, ранее окрашенный краской JOTUN SeaForce 30 с добавкой нанодисперсного порошка ПТФЭ, предварительно диспергированного в ксилоле, был осмотрен в ходе очередной постановки корабля в док. Установлено, что корпус не имеет обрастаний и степень истирания лакокрасочного покрытия не превышает установленных параметров. Принято решение о продлении эксплуатации корабля без перекраски его подводной части, и в настоящее время установлено, что срок службы краски с добавкой НПТФЭ ФОРУМ продлен в два раза.

Обсуждение результатов

Большое внимание исследователей уделяется лакокрасочным материалам экологически чистым, стойким к атмосферному воздействию, с длительным периодом эксплуатации, пожаробезопасным, с минимальным удержанием грязи и пыли, а также с ярко выраженным эффектом защиты от коррозии и биообрастания [1]. Всем этим требованиям отвечают ЛКМ, содержащие политетрафторэтилен [2]. Нами был создан новый класс ПТФЭ (ФОРУМ™) и его фракционная разновидность – низкомолекулярный порошок, состоящий из микрочастиц сферической формы размером около 1 мкм, морфологически состоящих из пакета нанопленок. Благодаря наноэффекту нанопленки легко налипают на любую поверхность, включая высокодисперсные материалы, что способствует легкости применения нового материала в любых композиционных материалах, в том числе в ЛКМ.

Существенной особенностью НПТФЭ ФОРУМ является его полимолекулярный состав. Разработан метод извлечения из базового НПТФЭ ФОРУМ различных молекулярных фракций, обладающих широким диапазоном температурных свойств. В результате анализа полученных данных трибологических испытаний установлено, что коэффициент трения для незащищенного металла достаточно высок и равен 0,45 (рис. 3, кривая 1). На начальном этапе испытаний коэффициент трения увеличивается, а затем происходит

выход на стабильное плато. Обработка образцов НПТФЭ различного фракционного состава приводит к снижению коэффициента трения в 4,5 раза (рис. 3, кривые 2–4), причем наименьший коэффициент трения (0,1) наблюдается для высокомолекулярной фракции ФОРУМ-4. Это позволяет нам сделать вывод о высоких антифрикционных свойствах формируемых покрытий и перспективности применяемой технологии. Длительные испытания также показали преимущество высокомолекулярного ФОРУМ-4, который дольше всех сохраняется на поверхности трения (рис. 4). На рис. 5 показано пятикратное снижение коэффициента трения на поверхности, окрашенной судовой эмалью ПФ-167 с ростом концентрации НПТФЭ от 10 до 30 %.

Гидрофобные и антиобледенительные свойства ЛКМ взаимосвязаны, и потому наблюдается обратная корреляция между прочностью удержания намерзшего льда и ростом краевого угла капли на поверхности испытываемого материала. При этом гидрофобность ЛКМ максимально возрастает при полном закрытии поверхности нанопленками ПТФЭ, т.е. при простом механическом натирании сухим порошком НПТФЭ. Увеличение значений контактного угла с увеличением концентрации в растворе хлористого натрия отмечено для различных исследуемых объектов [7], что объясняется [4, 8] увеличением поверхностного натяжения на границах раздела как твердое тело/жидкость, так и жидкость/газ. На рис. 6 представлены сравнительные результаты усилия отрыва льда от НПТФЭ покрытия в зависимости от концентрации NaCl в водном растворе, которые полностью согласуются с данными о контактном угле капли воды, содержащей NaCl в различной концентрации, т.е. чем выше концентрация NaCl, тем больше контактный угол и меньше усилие отрыва льда от поверхности НПТФЭ.

В мире прослеживается тенденция изготавливать противообрастающие краски без биоцидных добавок и с минимальным количеством растворителя. Исследования показали, что введение 10 % НПТФЭ по сухому остатку в состав ЛКМ оказывает противообрастающее действие как при добавлении в обычный железный сурик, так и в специальную противообрастающую краску с биоцидным компонентом SeaForce 30. Самый заметный противообрастающий эффект наблюдается в случае механического нанесения (натирания) сухого НПТФЭ на поверхность ЛКМ или просто на зачищенную и обезжиренную сухую поверхность металла (см. таблицу).

Скоростные испытания гидрофобных покрытий, полученных нанесением НПТФЭ на поверхность ЛКМ методом механического натирания, подтвердили их высокую адгезию к поверхности и способность удерживаться на ней длительное время при движении объекта под водой на скоростях свыше 170 км/ч.

Контрольные испытания большого ракетного катера проекта 1241 (ТОФ), покрашенного противообрастающей краской с добавками на основе НПТФЭ ФОРУМ, показали двукратное увеличение срока службы краски и, как следствие, существенное снижение затрат на докование и ремонт.

Заключение

НПТФЭ ФОРУМ с целью защиты от химического и биологического воздействия был испытан в качестве добавки в составе различных ЛКМ и показал высокую эффективность. В настоящей работе продолжены исследования и испытания НПТФЭ ФОРУМ и двух его фракций в составе ЛКМ, а также в качестве сухой краски для защиты металлов от трения, износа, биообрастания и для повышения гидрофобности покрытий. Результаты испытаний подтверждают высокую эффективность НПТФЭ ФОРУМ и определяют направление дальнейшей работы по совершенствованию материала и технологии применения в различных областях хозяйственной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврильчик Л.Д., Зобачёв Ю.Е., Соминская Э.В. Новые лакокрасочные покрытия // Морская индустрия. 1999. № 1. С. 86–90. – <http://www.internevod.com/rus/academy/sci/04/novie.shtml> (дата обращения: 12.07.2018).
2. Каблов В.Ф., Костин В.Е., Кондруцкий Д.А., Соколова Н.А. Оценка эффективности противообрастающих покрытий на основе фторопласта // Современ. наукоемкие технологии. 2010. № 5. С. 39–43.
3. Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. Л.: Химия, 1978. 230 с.
4. Пат. 2619687 Российская Федерация, МПК С 09 D 127/18, С 09 D 5/16, В 82 Y 30/00. Способ получения многофункциональных защитных покрытий / А.К. Цветников; Л.А. Матвеевко, А.В. Пузь, В.С. Егоркин, С.В. Гнеденков, А.Р. Гарифуллин. № 2015150853; заявл. 26.11.15; опубл. 17.05.17, Бюл. 14.
5. Цветников А.К. Термоградиентный метод синтеза нано- и микродисперсных фторуглеродных материалов. Свойства и применение // Вестн. ДВО РАН. 2009. № 2. С. 18–22.
6. Цветников А.К., Игнатьева Л.Н., Бузник В.М. Ультрадисперсные порошки политетрафторэтилена. Гл. 9 // Фторполимерные материалы / отв. ред. В.М. Бузник. Томск: НТЛ, 2017. С. 394–448.
7. Sghaier N., Prat M., Ben Nasrallah S. On the influence of sodium chloride concentration on equilibrium contact angle // Chem. Eng. J. 2006. Vol. 122. P. 47–53.
8. Zhang J., Borg M.K., Sefiane K., Reese J.M. Wetting and evaporation of salt-water nanodroplets: A molecular dynamics investigation // Phys. Rev. E. 2015. Vol. 92, N 5. 052403. DOI: 10.1103/PhysRevE.92.052403.