

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА МАРКИ GUR-4120, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ФУЛЛЕРЕНОВОЙ САЖЕЙ

³ Э. А. Ванюк, ¹ И. О. Соколов, ² А. В. Касперович,
² А. Н. Потапчик, ⁴ Э. Х. Газбан Задех

¹ Учреждение образования «Республиканский институт профессионального образования»,
г. Минск, Республика Беларусь

² Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь

³ Белорусский Национальный Технический Университет,
г. Минск, Республика Беларусь

⁴ ИЧПТУП «Бел Пека Пэйнт»,
г. Минск, Республика Беларусь

В статье приведены результаты исследований абразивной износостойкости, коррозионной стойкости, а также прочности сцепления газотермических полимерных покрытий на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), модифицированного наночастицами углерода фуллереновой сажи. Установлено, что применение 10 об. % фуллереновой сажи способствует увеличению эксплуатационных свойств покрытий: износостойкости – в 1,5 раза, коррозионной стойкости – в 3,6 раза, прочности сцепления – в 1,4 по сравнению с полимерным покрытием на основе СВМПЭ без модифицирующих добавок.

Ключевые слова: газопламенное напыление, сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), полимерные покрытия, фуллереновая сажа (наночастицы углерода), абразивная износостойкость, коррозионная стойкость, прочность сцепления

STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMAL SPRAY POLYMER COATINGS BASED ON ULTRA-HIGH- MOLECULAR POLYETHYLENE GUR-4120 MODIFIED WITH FULLERENE SOOT

³ E. A. Vanuk, ¹ I. O. Sokorov, ² A. V. Kasperovich,
² A. N. Potapchik, ⁴ E. Kh. Ghazban Zadeh

¹ Educational Institution «Republican Institute of Vocational Education»,
Minsk, Republic of Belarus

² Educational Institution «Belarusian State Technological University»,
Minsk, Republic of Belarus

³ Belarusian National Technical University,
Minsk, Republic of Belarus

⁴ Commercial Unitary Enterprise «Bel Peka Paint»,
Minsk, Republic of Belarus

The article presents the results of studies of abrasive wear resistance, corrosion resistance, and adhesion strength of thermal spray polymer coatings based on ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) modified with nanocarbon components of fullerene soot. It has been established that polymer coatings with a modifying additive vol. 10 % fullerene soot components increase wear resistance by 1.5 times, corrosion resistance by 3.6 times, adhesion strength by 1.4 times compared to a polymer coating based on UHMWPE without modifying additives.

Key words: thermal spraying, ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), polymer coatings, fullerene soot (nanocarbon), abrasive wear resistance, corrosion resistance, adhesion strength

e-mail:eduard.vanyuk@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных направлений машиностроения невозможно без разработки новых материалов и технологий обработки деталей машин и механизмов, обеспечивающих высокий уровень эксплуатационных характеристик. Одним из таких направлений является применение технологий упрочнения и восстановления поверхностей деталей с целью повышения их физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик. К таким технологиям относятся газотермические способы нанесения покрытий, позволяющие наносить на деталь как металлические, так и полимерные покрытия. Металлические покрытия применяют для работы деталей в тяжелых эксплуатационных условиях, влияющих на долговечность механизмов и машин, а полимерные покрытия применяют в основном для защиты поверхностей от коррозии, ультрафиолетового излучения, истирания, залипания материалов, а также в декоративных целях в различных отраслях промышленности.

Перспективным материалом с широким спектром функциональных свойств, который применяется в настоящее время во многих отраслях промышленности, является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), относящийся к термопластичным полимерам [1].

Достоинства СВМПЭ заключаются в сочетании высокой износостойкости, устойчивости к агрессивным средам, низкого коэффициента трения, высокой ударной вязкости, низкой температуры хрупкости, что позволяет применять изделия на его основе, в том числе в экстремальных условиях эксплуатации (температура хрупкости материала до -200 °С) [2–4].

В последнее время развивается новое направление применения полимерных покрытий – это создание фуллереносодержащих полимерных композиционных материалов, объединением полимеров с полезными свойствами фуллеренов. Активность фуллеренов позволяет применять их в технологических процессах, связанных с получением совершенно новых материалов.

Согласно результатам исследований авторов [5, 6] установлено, что у полимерных покрытий, модифицированных фуллереном, значительно повышаются эксплуатацион-

ные характеристики. В связи с этим было выдвинуто предположение, что модифицирование компонентами фуллереновой сажи покрытий на основе СВМПЭ марки GUR-4120 позволит повысить физико-механические и эксплуатационные свойства.

Известно, что даже незначительное добавление фуллереновых материалов приводит к существенному увеличению прочности и эластичности, а также к заметному снижению коэффициентов трения по металлу и истираемости, а также увеличению температур плавления и деструкции [6–9].

Цель исследования заключалась в определении физико-механических свойств газотермических полимерных покрытий на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена марки GUR-4120 (далее – СВМПЭ), модифицированного нанокремнекислотными компонентами.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Предложено модифицировать частицами фуллереновой сажи полимерный порошок на основе СВМПЭ, применяемый для компрессионного формования, поршневой экструзии, свободного спекания пористых деталей, а также в качестве газотермических защитных покрытий. Полимерные покрытия используются в различных отраслях промышленности: автомобилестроение (защита кузовов самосвалов и бункеров, перевозящих песчаные и соляные смеси), текстильная и целлюлозно-бумажная отрасли (катки, зубчатые передачи, опорные втулки, направляющие), химическая отрасль (фильтры для работы в агрессивных средах, защита поверхностей от агрессивных сред), жилищно-коммунальное хозяйство (облицовка ковшей, столбов, поручней, ограждений), судостроение (защита корпусов судов, трубопроводов и ограждений), спорт (лыжи, сноуборды), строительство (защита металлических конструкций от коррозии, элементов зданий и сооружений) и др. [10].

На основе анализа существующих способов смешивания порошков, а также требований, предъявляемых к полимерным порошковым материалам с учетом трудоемкости процесса смешивания, способом введения нанокремнекислотных компонентов выбрано механическое перемешивание в лопастной мельнице. Для полноты эксперимента, модификация полимерного порошка производилась графитом в количестве 10 об. % и фуллереновой сажой в количествах 5 и 10 об. % (рис. 1).

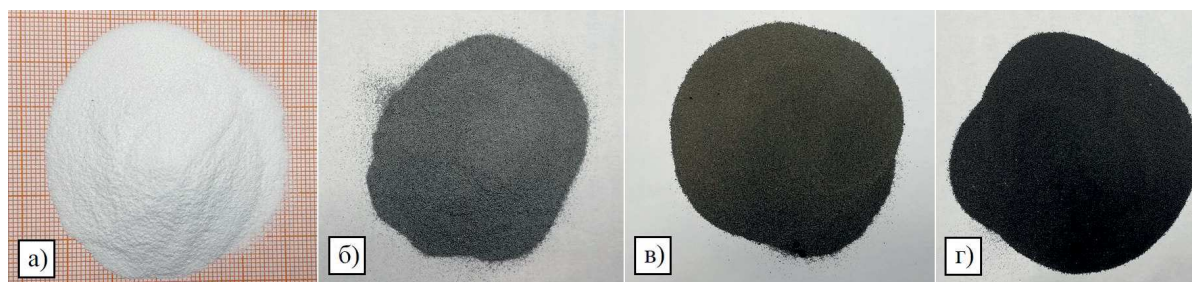


Рис. 1. Фотографии полимерных порошковых материалов на основе СВМПЭ после механического перемешивания в механической лопастной мельнице:

- а – СВМПЭ без модифицирующих добавок; б – СВМПЭ с модифицирующей добавкой 10 об. % графита; в – СВМПЭ с модифицирующей добавкой фуллереновой сажи 5 об. %; г – СВМПЭ с модифицирующей добавкой фуллереновой сажи 10 об. %

Нанесение полимерных покрытий на основе СВМПЭ газопламенным напылением производилось термораспылительной установкой ТРУ-БПИ.

Режимы напыления покрытий: давление кислорода 0,14–0,20 МПа; давление пропан-бутана 0,06–0,08 МПа; давление воздуха 0,25–0,45 МПа; дистанция напыления

200–350 мм; угол напыления: 90 °С; подача: 15–30 мм/с. На рис. 2 представлена фотография процесса газопламенного напыления полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированного нанокремнеземными компонентами фуллереновой сажи в количестве 10 об. %.

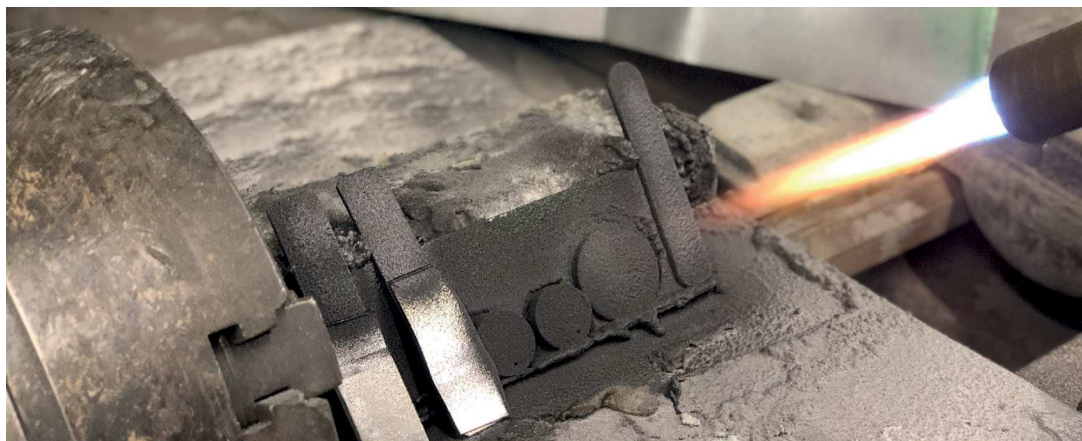


Рис. 2. Процесс газопламенного напыления полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированного нанокремнеземными компонентами фуллереновой сажи в количестве 10 об. %

Исследование абразивной износостойкости полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированных нанокремнеземными компонентами.

Определение абразивной износостойкости выполнялось на приборе Taber GT-7012-T по ИСО 7784-2 «Метод определения стойкости покрытий при воздействии абразивного резинового колеса».

Для каждого образца определяли потерю массы на заданное число оборотов круга, за тем вычисляли среднюю потерю массы у каждого образца. Общее время испытаний для каждого из образцов составило 13,9 мин на 1000 циклов.

На рис. 3 представлена фотография образцов с полимерными покрытиями на основе СВМПЭ, подготовленных для исследования абразивной износостойкости.

На рис. 4 представлена гистограмма износостойкости полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированных нанокремнеземными компонентами.

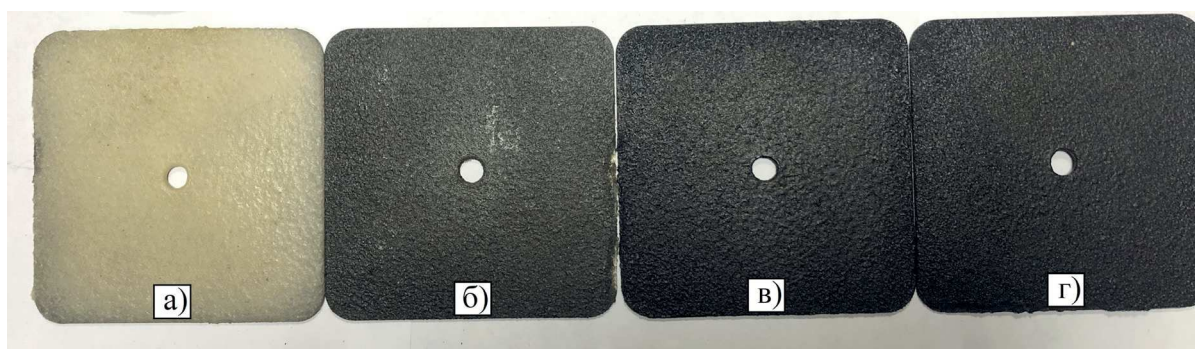


Рис. 3. Образцы с полимерными покрытиями на основе СВМПЭ, для исследования на абразивную износостойкость:

- а* – СВМПЭ без модифицирующих добавок;
- б* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой 10 об. % графита;
- в* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой фуллереновой сажи 5 об. %;
- г* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой фуллереновой сажи 10 об. %



Рис. 4. Гистограмма износостойкости полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированных нанокремнеземными компонентами:
а – СВМПЭ без модифицирующих добавок; *б* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой 10 об. % графита; *в* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой фуллереновой сажи 5 об. %; *г* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой фуллереновой сажи 10 об. %

Анализ результатов исследований на абразивную износостойкость газотермических полимерных покрытий на основе СВМПЭ позволил установить, что:

- износостойкость у полимерных покрытий с модифицирующей добавкой компонентов фуллереновой сажи в количестве 5 об. % повысилась в 1,4 раза по сравнению с полимерным покрытием на основе СВМПЭ без модифицирующих добавок.

- износостойкость полимерных покрытий на основе СВМПЭ с 10 об. % модифицирующей добавки компонентов фуллереновой сажи повысилась в 1,5 раза по сравнению с полимерным покрытием на основе СВМПЭ без модифицирующих добавок.

- введение 10 об. % модифицирующей добавки в виде графита способствует снижению износостойкости в 1,2 раза.

Исследование коррозионной стойкости полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированных нанокремнеземными компонентами.

Исследование коррозионной стойкости полимерных покрытий производилось в естественных (полевых) условиях методом качественной оценки покрытий. Покрытия наносили на подложки их стали марки 08 пс. В качестве предварительной подготовки поверхности перед нанесением покрытий, производили очистку образцов *а–г* (рис. 6) бумагой абразивной водостойкой Р800 ГОСТ 10054-82. Образец *д* (рис. 6) подготовили дробеструйной обработкой колотой чугуновой дробью ДЧК № 0.5 и 0.8 ГОСТ 11964-81 с грануляцией 1,2–2,0 мм при давлении сжатого воздуха 0,45–0,6 МПа.

Испытания коррозионной стойкости стальных пластин с нанесенными покрытиями проводили в специально отведенном месте на открытом воздухе под воздействием атмосферных осадков (снег, дождь, прямые лучи солнца) в течение 2 лет. Для исследований использовалось 5 видов образцов (рис. 5).

Первые признаки отслоения были установлены у следующих покрытий: СВМПЭ с добавкой 10 об. % графита после 5 месяцев испытаний и СВМПЭ без модифицирующих добавок, нанесенного на отдробеструенную поверхность. У полимерных покрытий СВМПЭ с добавкой 5 об. % фуллереновой сажи признаки отслоения были установлены после 7 месяцев испытаний.

На рис. 6 представлены образцы с полимерными покрытиями на основе СВМПЭ, модифицированными нанокремнеземными компонентами после 25 месяцев испытаний в естественных (полевых) условиях.

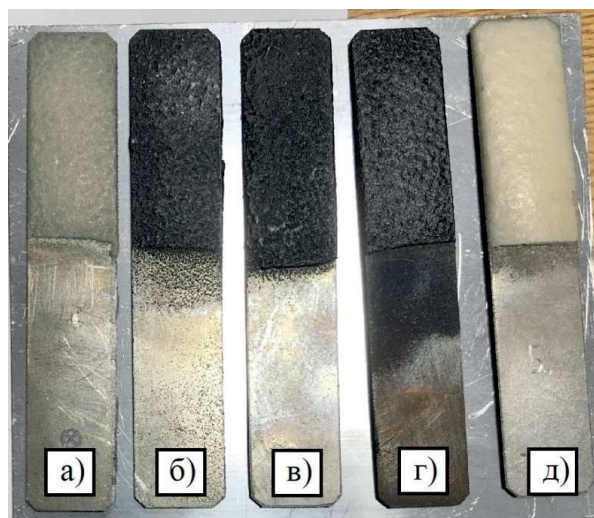


Рис. 5. Образцы для исследований коррозионной стойкости полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированных нанокремнекислотными компонентами:
а – СВМПЭ без модифицирующих добавок; *б* – СВМПЭ с 10 об. % графита;
в – СВМПЭ с 5 об. % модифицирующей добавки в виде фуллереновой сажи;
г – СВМПЭ с 10 об. % модифицирующей добавки в виде фуллереновой сажи;
д – СВМПЭ без модифицирующих добавок, нанесенный на отдробеструенную поверхность

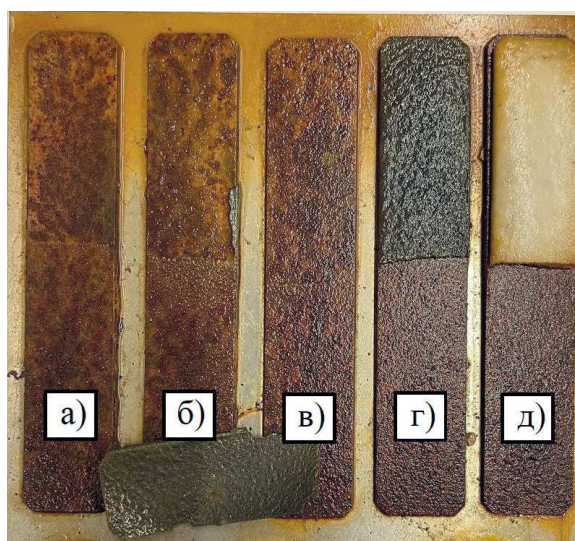


Рис. 6. Состояние исследуемых образцов после 25 месяцев испытаний в естественных (полевых) условиях:
а – СВМПЭ без модифицирующих добавок; *б* – СВМПЭ с 10 об. % графита;
в – СВМПЭ с 5 об. % модифицирующей добавки в виде фуллереновой сажи;
г – СВМПЭ с 10 об. % модифицирующей добавки в виде фуллереновой сажи;
д – СВМПЭ без модифицирующих добавок, нанесенный на отдробеструенную поверхность

По результатам исследований коррозионной стойкости полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированных нанокремнекислотными компонентами получена гистограмма (рис. 7).



Рис. 7. Гистограмма коррозионной стойкости полимерных покрытий на основе СВМПЭ марки GUR-4120, модифицированных нанокремнекислотными компонентами:
а – СВМПЭ без модифицирующих добавок; *б* – СВМПЭ с 10 об. % графита;
в – СВМПЭ с 5 об. % модифицирующей добавки в виде фуллереновой сажи;
г – СВМПЭ с 10 об. % модифицирующей добавки в виде фуллереновой сажи;
д – СВМПЭ без модифицирующих добавок, нанесенный на отдробеструенную поверхность

Согласно результатам исследований коррозионной стойкости полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированных нанокремнекислотными компонентами после 25 месяцев испытаний в естественных (полевых) условиях установлено, что коррозионная стойкость у покрытий СВМПЭ с добавкой 10 об. % фуллереновой сажи в 3,6 раза выше, чем у покрытия на основе СВМПЭ без модифицирующих добавок. Коррозионная стойкость у покрытия на основе СВМПЭ с добавкой 10 об. % графита в 1,4 раза ниже, чем у покрытия на основе СВМПЭ без модифицирующих добавок. Коррозионная стойкость у покрытия на основе СВМПЭ с добавкой 5 об. % фуллереновой сажи равна стойкости покрытия на основе СВМПЭ без модифицирующих добавок.

Исследование прочности сцепления полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированных нанокремнекислотными компонентами.

Прочность сцепления полимерных покрытий определяли методом отрыва в соответствии с ГОСТ 32299. Сущность метода заключалась в определении усилия, необходимого для отрыва покрытия от защищаемой поверхности в направлении, перпендикулярном к плоскости покрытия. Вид образцов после испытаний представлен на рис. 8, гистограмма испытаний на рис. 9.

Согласно результатам исследований образцов (рис. 9) установлено, при введении в СВМПЭ 10 об. % графита прочность сцепления покрытия с подложкой повышается в 1,3 раза, а введение фуллереновой сажи в количестве 5 об. % и 10 об. % соответственно способствует повышению прочности сцепления в 1,4 раза.

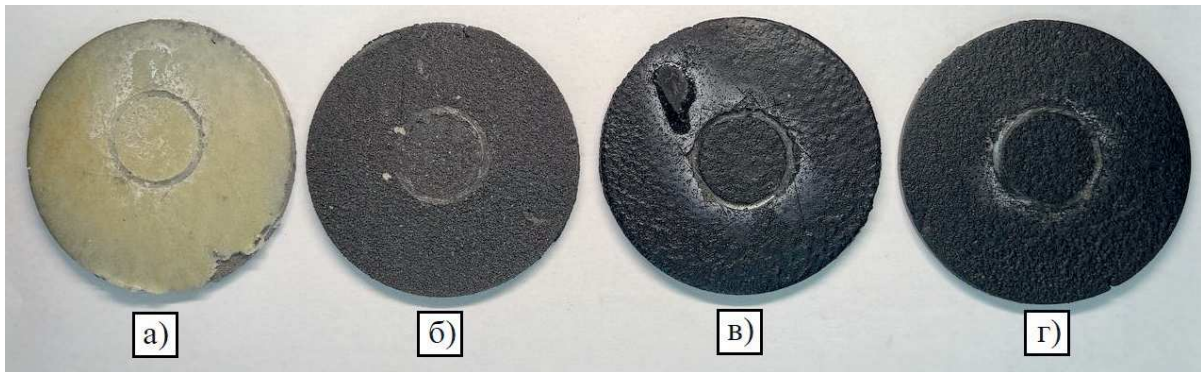


Рис. 8. Образцы с полимерными покрытиями на основе СВМПЭ, модифицированных нанокремнеземными компонентами после испытаний на прочность сцепления:
а – СВМПЭ без модифицирующих добавок; *б* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой 10 об. % графита; *в* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой фуллереновой сажи 5 об. %; *г* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой фуллереновой сажи 10 об. %



Рис. 9. Гистограмма прочности сцепления полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированных нанокремнеземными компонентами:
а – СВМПЭ без модифицирующих добавок; *б* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой 10 об. % графита; *в* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой 5 об. % фуллереновой сажи; *г* – СВМПЭ с модифицирующей добавкой 10 об. % фуллереновой сажи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ абразивной износостойкости газотермических полимерных покрытий на основе СВМПЭ показал, что введение 5 и 10 об. % фуллереновой сажи повышает износостойкость полимерных покрытий в 1,4 и 1,5 соответственно по сравнению с полимерным покрытием без модифицирующих добавок. В то же время применение в качестве модифицирующей добавки 10 об. % графита снижает износостойкость покрытий в 1,2 раза.

Согласно результатам исследований коррозионной стойкости полимерных покрытий на основе СВМПЭ, модифицированного нанокремнеземными компонентами, установлено, что коррозионная стойкость покрытий на СВМПЭ с добавкой 10 об. % фуллереновой сажи в 3,6 раза выше, чем у покрытия на основе СВМПЭ без модифицирующих добавок. Коррозионная стойкость покрытия на основе СВМПЭ с добавкой 10 об. % графита в 1,4 раза ниже, чем у покрытия на основе СВМПЭ без модифицирующих добавок.

Коррозионная стойкость у покрытия на основе СВМПЭ с добавкой 5 об. % фуллереновой сажи равна стойкости покрытия на основе СВМПЭ без модифицирующих добавок.

Исследование прочности сцепления полимерных покрытий на основе СВМПЭ показало, что введение 10 об. % графита повышает данный показатель в 1,3 раза по сравнению с полимерным покрытием без модифицирующих добавок. У покрытий, модифицированных введением 5 и 10 об. % фуллереновой сажи, прочность сцепления повысилась в 1,4 раза по сравнению с полимерным покрытием на основе СВМПЭ без модифицирующих добавок.

Результаты проведенных исследований позволили установить положительное влияние модифицирующих добавок на физико-механические свойства полимерных покрытий на основе СВМПЭ.

Областью применения полученных покрытий является напыление внутренних поверхностей трубопроводов в местах изгиба, футеровки кузовов самосвалов, полувагонов, ковшей экскаваторов, приемных бункеров, поручней ограждения, корпусов судов, различных сложных поверхностей на изгибах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валуева, М. И. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направление применения (обзор) / М. И. Валуева, А. С. Колобков, С. С. Малаховский // Труды ВИАМ, 2020. – № 3 (87). – Стр. 49–57.
2. Михайлин, Ю. А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 1) / Ю. А. Михайлин // Полимерные материалы, 2003. – № 3. – С. 18–21.
3. Михайлин, Ю. А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 2) / Ю. А. Михайлин // Полимерные материалы, 2003. – № 4. – С. 24–27.
4. Формирование многослойных покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена на поверхности параамидных тканей методом газопламенного напыления / О. Г. Девойно [и др.] // Сборник: Машиностроение. – Минск, 2020. – Вып. 32. – Стр. 13–18.
5. Взаимодействие фуллеренов с полимерами / Т. И. Игуменова [и др.] // Вестник ВГУИТ, 2012. – № 2. – Стр. 125–127.
6. Буря, А. И. Исследование свойств нанокompозитов на основе ароматического полиамида и фуллереновой черни / А. И. Буря, О. Ю. Кузнецова // Вестник ХНАДУ, 2010. – Вып. 51. – Стр. 96–99.
7. Волочко, А. Т. Исследования свойств композитов на основе алюминий-кремниевого сплава и наноструктурированного углерода / А. Т. Волочко, А. А. Шегидевич // Новые материалы и технологии в машиностроении, ФГБОУ ВПО Брянская государственная инженерно-технологическая академия, 2014. – Стр. 31–35.
8. Куц, С. Д. Фуллереновая чернь: строение, свойства и применение / С. Д. Куц, Н. С. Куюнко // Журнал общей химии, 2011. – Т. 81. – Вып. 2.
9. Фуллереновая сажа электродугового синтеза / Е. А. Грузинская [и др.] // Наносистемы: физика, химия математика, 2012. – 3 (6). – С. 83–90.
10. Галибеев, С. С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы / С. С. Галибеев, Р. З. Хайруллин, В. П. Архиреев // Вестник Казанского технологического университета, 2008. – № 2. – С. 50–55.

REFERENCE

1. Valueva, M. I. Ultrahigh molecular weight polyethylene: market, properties, application (review) / M. I. Valueva, A. S. Kolobkov, S. S. Malakhovskiy // Proceedings of VIAM, 2020. – No. 3 (87). – Pp. 49–57.
2. Mikhailin, U. A. Ultrahigh molecular weight polyethylene (part 1) / U. A. Mikhailin // Polymer materials, 2003. – No. 3. – Pp. 18–21.
3. Mikhailin, U. A. Ultrahigh molecular weight polyethylene (part 2) / U. A. Mikhailin // Polymer materials, 2003. – No. 4. – Pp. 24–27.
4. Formation of multilayer coatings with ultra-high molecular weight polyethylene on the surface of paraamide fabrics by flame spraying / O. G. Devoino [et al.] // Collection: Engineering. – Minsk 2020. – Issue. 32. – Pp. 13–18.

5. Interaction of fullerenes with polymers / T. I. Igumenova [et al.] // Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technology (VSUET), 2012. – No. 2. – Pp. 125–127.
6. Buria, A. I. Study of the properties of nanocomposites based on aromatic polyamide and fullerene black / A. I. Buria, O. U. Kuznetsova // Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University (KhNAHU), 2010. – Vol. 51. – Pp. 96–99.
7. Volochko, A. T. Studies of the properties of composites based on aluminum-silicon alloy and nanostructured carbon / A. T. Volochko, A. A. Shegidevich // Journal: new materials and technologies in mechanical engineering. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education (FSBEI HPE) Bryansk State Engineering and Technology Academy, 2014. – Pp. 31–35.
8. Kush, S. D. Fullerene black: structure, properties and application / S. D. Kush, N. S. Cujunco // Journal of General Chemistry, 2011. – V. 81. – Issue. 2.
9. Fullerene soot of electric arc synthesis / E. A. Gruzinskaya [et al.] // Nanosystems: physics, chemistry mathematics, 2012. – 3(6). – Pp. 83–90.
10. Galibeev, S. S. Ultra-high molecular weight polyethylene. Trends and prospects / S. S. Galibeev, R. Z. Khairullin, V. P. Arkhireev // Bulletin of the Kazan Technological University, 2008. – No. 2. – Pp. 50–55.

Статья поступила в редакцию 14.05.2023 г.