

УДК 691.175.2⁶

Е. В. Овчинников¹, доктор технических наук, доцент,
А. И. Веремейчик², кандидат физико-математических наук, доцент,
Д. А. Линник³, кандидат технических наук, доцент,
А. Н. Парфиевич⁴, кандидат технических наук, доцент,
М. В. Нерода⁵, кандидат технических наук, доцент,
А. В. Проволенок⁶, Е. В. Кузнецов⁷, С. О. Лях⁸

- ^{1,3} Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», ул. Курчатова, 1а, 230015 Гродно, Республика Беларусь, ovchin@grsu.by
^{2,4} Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», ул. Московская, 267, 224017 Брест, Республика Беларусь
⁵ Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь
^{6,7} Открытое акционерное общество «Минский механический завод имени С.И. Вавилова — управляющая компания холдинга «БелОМО», ул. Макаенка, 23, 220114 Минск, Республика Беларусь
⁸ Технологический колледж учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы», ул. Горького, 84, 230015 Гродно, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ МАЛОСЛОЙНОГО ГРАФЕНА НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИЭФИРНЫХ ПОКРЫТИЙ

В работе представлены результаты исследования влияния модификации полиэфирных покрытий малослойным графеном на их поверхностные энергетические характеристики. Целью работы является анализ изменения смачиваемости и поверхностной энергии композиционных покрытий, сформированных методом электростатического осаждения на металлических подложках различной природы. Выявлены немонотонные зависимости свойств от концентрации наполнителя, обусловленные типом подложки. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации состава защитных покрытий в целях повышения коррозионной стойкости и снижения адгезии к полярным средам.

Ключевые слова: малослойный графен; композиционные полиэфирные покрытия; исследование влияния модификации полиэфирных покрытий; немонотонные зависимости.

Рис. 12. Библиогр.: 10 назв.

E. V. Ovchinnikov¹, DSc in Technical Sciences, Associate Professor,
A. I. Veremeychik², PhD in Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor,
D. A. Linnik³, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. N. Parfievich⁴, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
M. V. Niaroda⁵, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A. V. Provolenok⁶, E. V. Kuznetsov⁷, S. O. Lyakh⁸

- ^{1,3} Institution of Education “Yanka Kupala State University”, 1a Kurchatov Str., 230015 Grodno, the Republic of Belarus
^{2,4} Institution of Education “Brest State Technical University”, 267 Moskovskaya Str., 224017 Brest, the Republic of Belarus
⁵ Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus
^{6,7} Open Joint Stock Company “Minsk Mechanical Works named after S.I. Vavilov — managing company of BelOMO holding”, 23, Makayenka Str., 220114 Minsk, the Republic of Belarus
⁸ The Technological College of the educational institution “Yanka Kupala State University of Grodno”, 84 Gorky Str., 230015 Grodno, the Republic of Belarus

EFFECT OF LOW-LAYER GRAPHENE ON THE SURFACE CHARACTERISTICS OF COMPOSITE POLYESTER COATINGS

The paper presents the results of a study of the effect of polyester coatings modification with low-layer graphene on their surface energy characteristics. The aim of the work is to analyze the changes in wettability and surface energy of composite coatings formed by electrostatic deposition on various types metal substrates. The non-monotonic

dependence of the properties on the filler concentration, which is determined by the substrate type, has been revealed. The obtained data can be used to optimize the protective coatings composition in order to increase their corrosion resistance and reduce their adhesion to polar environments.

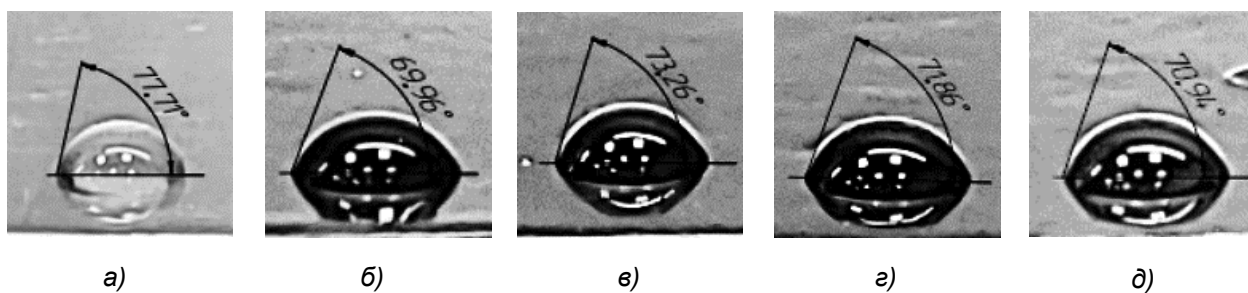
Key words: low-layer graphene; composite polyester coatings; study of the influence of polyester coatings modification; non-monotonic dependencies.

Fig. 12. Ref.: 10 titles.

Введение. Эксплуатационные характеристики изделий, такие как коррозионная стойкость, магнитная и диэлектрическая проницаемость, износостойкость и отражательная способность, теплоспротивление, изотропность и анизотропность, определяются свойствами поверхности. Надежность и долговечность деталей и функциональных узлов машин, механизмов, конструкций определяются конструктивной прочностью материалов, из которых они выполнены. Для получения высоких характеристик конструктивной прочности поверхностных слоев часто применяют различные методы нанесения покрытий, позволяющие защитить материал основы от внешних воздействий, повысить срок службы деталей и сократить расходы на ремонт изношенного оборудования [1—3]. Дополнительные эксплуатационные характеристики изделий можно улучшить, создавая искусственные поверхностные слои, которые могут отличаться от материала основы химическим и фазовым составами, структурой и свойствами. Их называют покрытиями. Покрытия наносятся для защиты поверхности от различных видов воздействий, в декоративных целях и для восстановления нарушенной геометрии изделий. В настоящее время существует следующая классификация покрытий по технологии нанесения, виду энергетического формирования, составу, природе происхождения: механические, химические, физические, физико-химические, органические, неорганические, металлополимерные, тонкие, толстые и т. п. [2; 3]. Одним из наиболее распространенных методов формирования покрытий как в строительной индустрии, так и в машиностроении является электростатическое осаждение порошковых материалов. Поверхностные свойства полимерных композитов играют ключевую роль в формировании их эксплуатационных характеристик, поэтому основной задачей данного раздела стал анализ взаимодействия жидкостей с модифицированной поверхностью образцов [4—6].

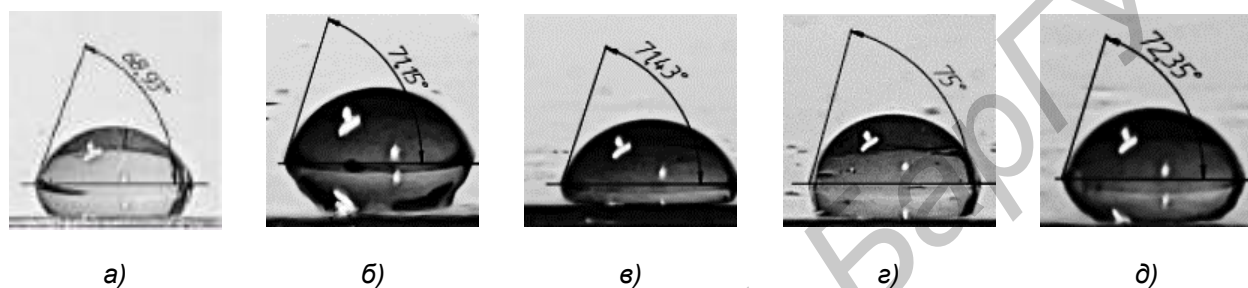
Методология и методы исследования. В качестве базового материала для модифицирования использовали полиэфирную смолу марки ZVEZDALIT P RAL 9005 производства Helios Srbija a.d. Для модифицирования полиэфирной матрицы использовали малослойный графен (далее — МС) производства ФТИ им. А. Ф. Иоффе, получаемый по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [7; 8]. Концентрация данного модификатора в композиции составляла от 0,1 до 1,5 масс. %. Введение наноразмерных частиц в полимерный порошок осуществляли на быстроходном смесителе, время перемешивания составляло 1...2 мин. Нанесение покрытий осуществляли на стандартной установке для электростатического нанесения полимерных порошковых материалов. Температура полимеризации композиции составляла 180 °С, время термообработки — 15 мин. В качестве подложки, на которой формировали покрытия, использовали низкоуглеродистую аустенитного класса сталь типа 12X18H10T, сталь 08кп, алюминиевый сплав АМг1.

Результаты исследования и их обсуждение. Поверхностная энергия твёрдых тел является ключевым параметром, определяющим адгезионные, смачивающие и защитные свойства покрытий. В данной работе использован метод измерения краевых углов смачивания двумя жидкостями с известными компонентами поверхностного натяжения: глицерином (преимущественно дисперсионное взаимодействие) и водой (выраженный полярный вклад). Расчёт выполнялся по методу Оуэнса—Вендта, позволяющему разделить полную поверхностную энергию на дисперсионную и полярную составляющие. На каждую подложку наносилось покрытие на основе МС (гидрофобизирующий компонент), способного изменять активность поверхностных слоев композиционных покрытий [7—10]. Концентрация графеноподобных структур (далее — ГПС) варьировалась от 0,1 до 3 мас. %. Краевые углы смачивания глицерина и воды для различных поверхностей представлены на рисунках 1—6.



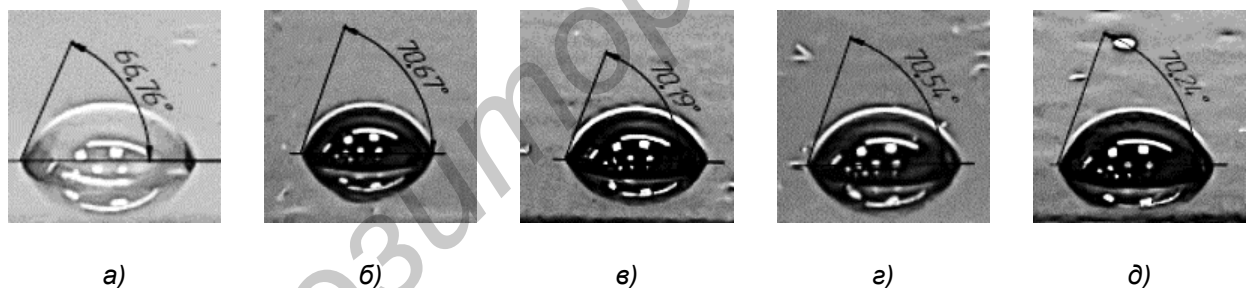
а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

Рисунок 1. — Угол смачивания глицерина для покрытия, нанесенного на металлическую пластину 12Х18Н10Т



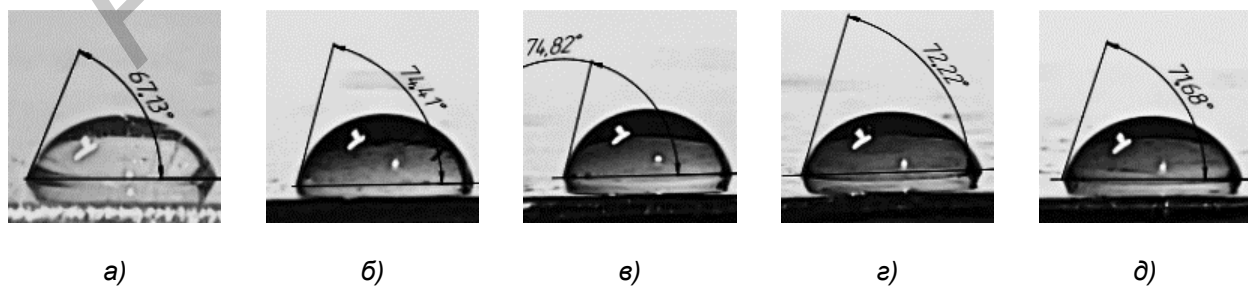
а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

Рисунок 2. — Угол смачивания водой для покрытия, нанесенного на металлическую пластину 12Х18Н10Т



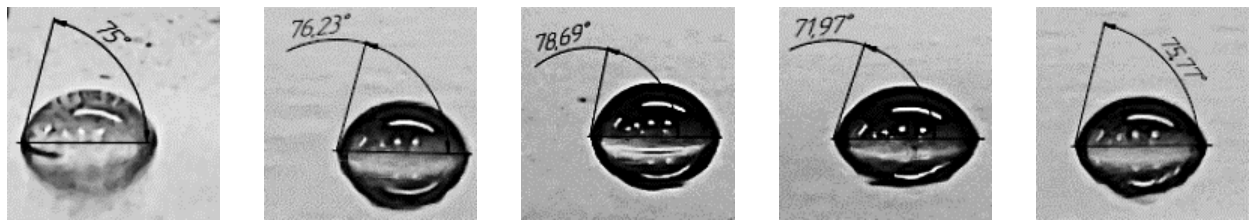
а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

Рисунок 3. — Угол смачивания глицерина для покрытия, нанесенного на металлическую пластину АМг1



а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

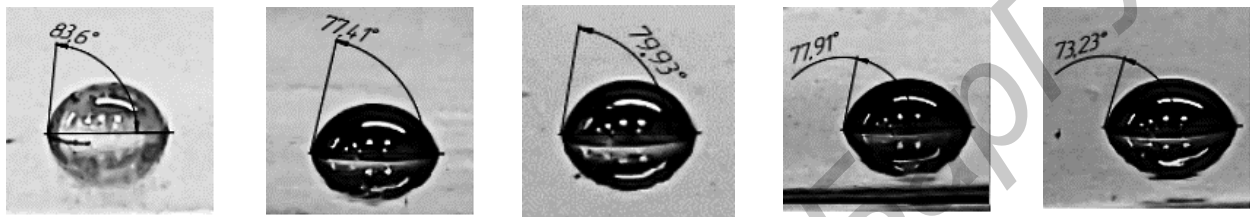
Рисунок 4. — Угол смачивания водой для покрытия, нанесенного на металлическую пластину АМг1



а) б) в) г) д)

а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

Рисунок 5. — Угол смачивания водой для покрытия, нанесенного на металлическую пластину 08кп



а) б) в) г) д)

а — без покрытия; б — концентрация ГПС — 0,1 мас. %; в — концентрация ГПС — 0,5 мас. %; г — концентрация ГПС — 1 мас. %; д — концентрация ГПС — 3 мас. %

Рисунок 6. — Угол смачивания глицерина для покрытия, нанесенного на металлическую пластину 08кп

Результаты исследований работы адгезии глицерина и воды к композиционному покрытию, удельной поверхностной энергии (далее — УПЭ) покрытия, сформированного на разных материалах, от концентрации модификатора приведены на рисунках 7—11.

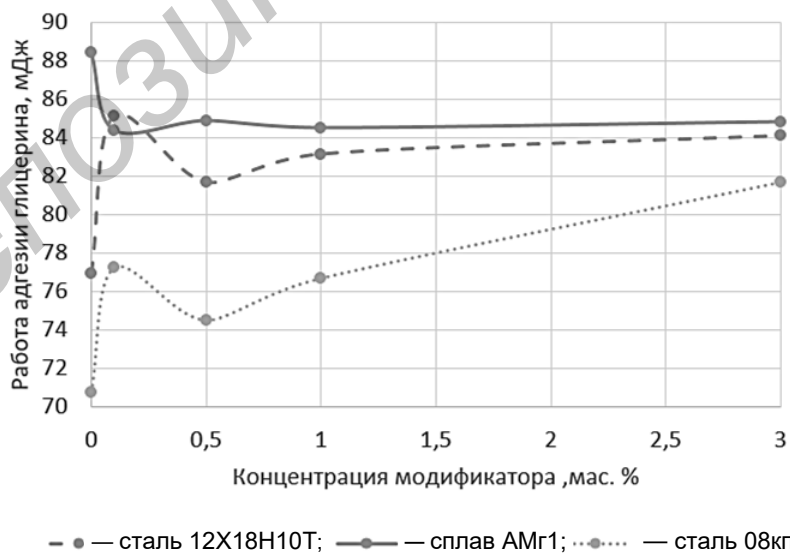


Рисунок 7. — Зависимость работы адгезии глицерина к композиционному покрытию на основе полиэфирной смолы, сформированному на разных материалах, от концентрации модификатора

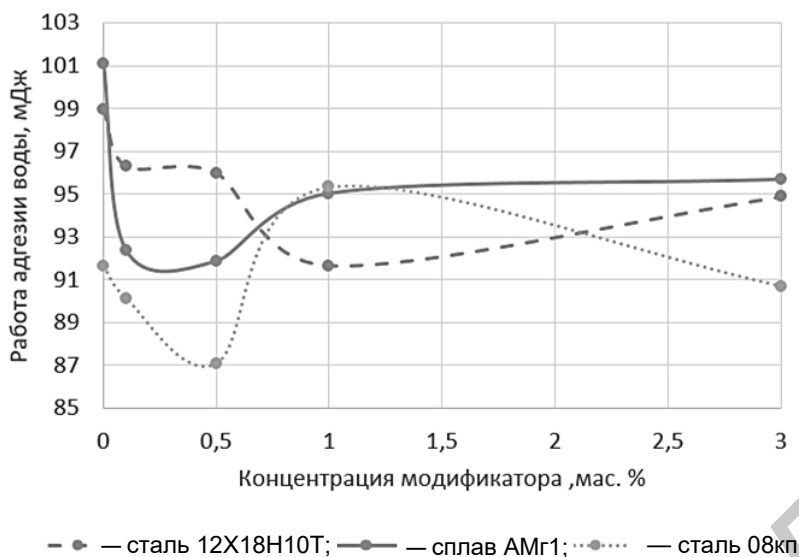


Рисунок 8. — Зависимость работы адгезии воды к композиционному покрытию на основе полиэфирной смолы, сформированному на разных материалах, от концентрации модификатора

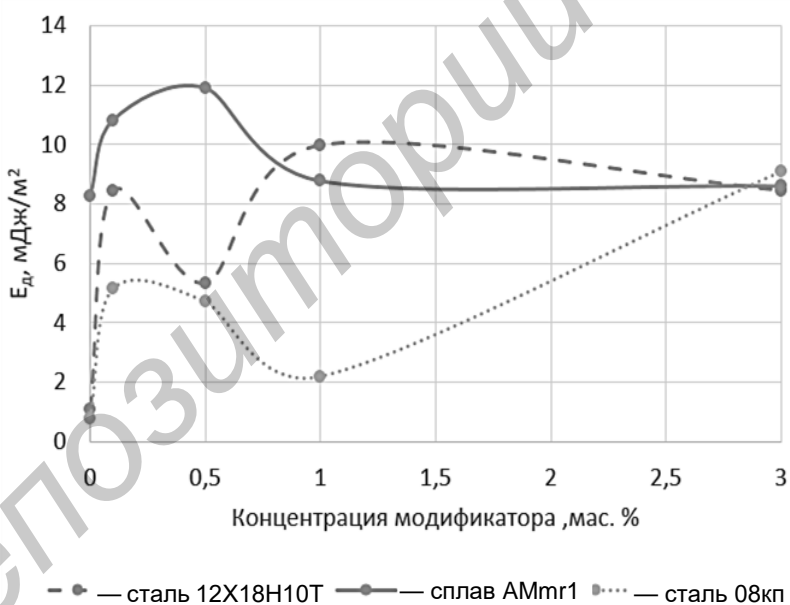


Рисунок 9. — Зависимость дисперсной составляющей УПЭ композиционного покрытия на основе полиэфирной смолы, сформированного на разных материалах, от концентрации модификатора

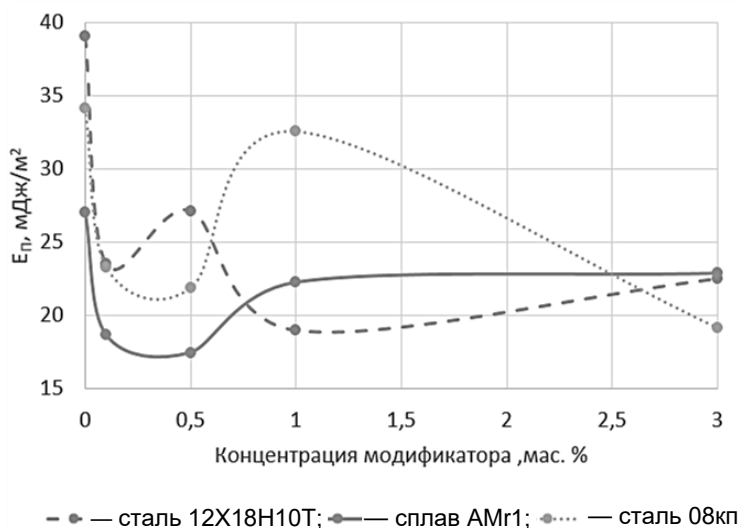


Рисунок 10. — Зависимость полярной составляющей УПЭ композиционного покрытия на основе полиэфирной смолы, сформированного на разных материалах, от концентрации модификатора

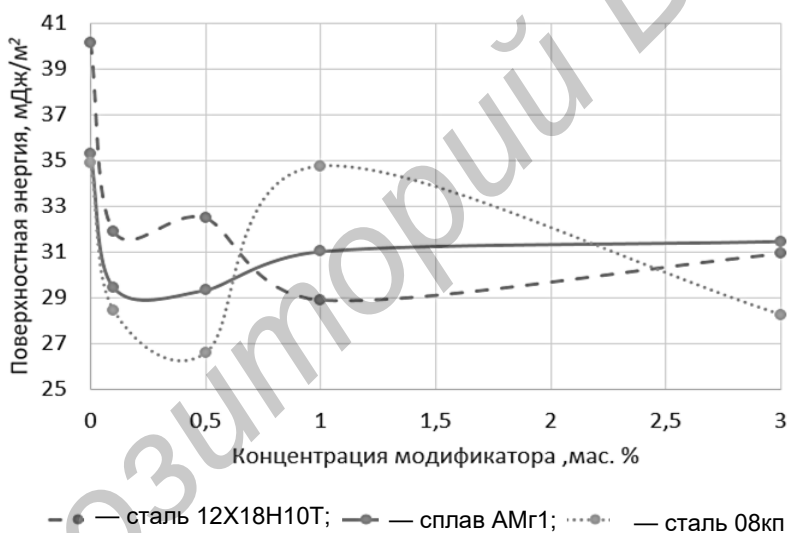


Рисунок 11. — Зависимость УПЭ композиционного покрытия на основе полиэфирной смолы, сформированного на разных материалах, от концентрации модификатора

Исходная поверхность стали 12X18H10T без покрытия характеризуется умеренно гидрофильными свойствами, так как значения угла смачивания водой составляют $68^{\circ}54'$, глицерином — $77^{\circ}42'$. Введение МС приводит к заметному изменению смачивания: угол смачивания глицерином снижается с $77^{\circ}42'$ до $69^{\circ}56'$... $73^{\circ}18'$ для всех концентраций, что указывает на улучшение смачивания неполярной жидкостью. Значения угла смачивания водой увеличиваются до $71^{\circ}06'$... 75° , т. е. смачивание полярной жидкостью ухудшается. Значения работы адгезии к глицерину увеличиваются с 76,9 до 81,7...85,1 мДж, тогда как значения работы адгезии к воде снижаются с 99,0 до 91,6...96,3 мДж. Это свидетельствует о том, что покрытие делает поверхность менее полярной, усиливая её взаимодействие с неполярными средами, ослабляя — с полярными. Удельная поверхностная энергия стали 12X18H10T достаточно высокая и составляет 40,15 мДж / м², причём основной вклад вносит

полярная составляющая ($39,07 \text{ мДж / м}^2$), а дисперсионная составляющая мала ($1,08 \text{ мДж / м}^2$). Это типично для окисленной металлической поверхности с высоким содержанием полярных групп. Формирование полиэфирного покрытия с МС приводит к снижению значений полной УПЭ до $28,9...32,5 \text{ мДж / м}^2$, резкому возрастанию дисперсионного компонента (до $5,3...10,0 \text{ мДж / м}^2$) и существенному уменьшению полярного компонента УПЭ (до $18,9...27,1 \text{ мДж / м}^2$). Минимальное значение ($28,9 \text{ мДж / м}^2$) достигается при 1 мас. % МС. При дальнейшем увеличении концентрации до 3 мас. % поверхностная энергия незначительно возрастает ($30,93 \text{ мДж / м}^2$), что может быть связано с перестройкой структуры покрытия или неполным его формированием. Таким образом, на стали 12Х18Н10Т полиэфирное покрытие, содержащие МС, эффективно снижает полярность поверхности, повышает дисперсионную составляющую и в целом уменьшает поверхностную энергию, что способствует улучшению гидрофобных свойств. Необходимо отметить, что изменение свойств покрытий, модифицированных МС, определяется также морфологией частиц, которые имеют высокие значения УПЭ (рисунок 12).

Исходный алюминиевый сплав имеет более низкие значения поверхностной энергии, чем коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т. Значения краевого угла смачивания водой составляют $67^{\circ}06'$, глицерином — $66^{\circ}48'$. После введения в состав покрытия МС изменений улучшается смачивание глицерином, значения краевого угла смачивания увеличиваются с $66^{\circ}48'$ до $70^{\circ}12'...70^{\circ}42'$, т. е. смачивание неполярной жидкостью ухудшается с увеличением концентрации модификатора в покрытии, что противоположно зависимости, наблюдаемой при формировании покрытия на стали 12Х18Н10Т. Значения краевого угла смачивания водой модифицированных полиэфирных покрытий также возрастают с $67^{\circ}06'$ до $71^{\circ}42'...74^{\circ}48'$, причём максимальное увеличение фиксируется при концентрации 0,5 мас. % ($74,8^{\circ}$) МС в полиэфирном покрытии. Работа адгезии композиционного покрытия к глицерину снижается с 88,4 до $84,4...84,9 \text{ мДж}$, а к воде — с 101,1 до $91,9...95,7 \text{ мДж}$. Снижение работы адгезии к обеим жидкостям указывает на общее уменьшение энергетического взаимодействия поверхности покрытия с исследуемыми жидкостями. Для сплава АМг1 без покрытия характерны следующие значения: УПЭ — $35,28 \text{ мДж / м}^2$, дисперсионной компоненты поверхностной энергии — $8,27 \text{ мДж / м}^2$, полярной компоненты — $27,01 \text{ мДж / м}^2$.

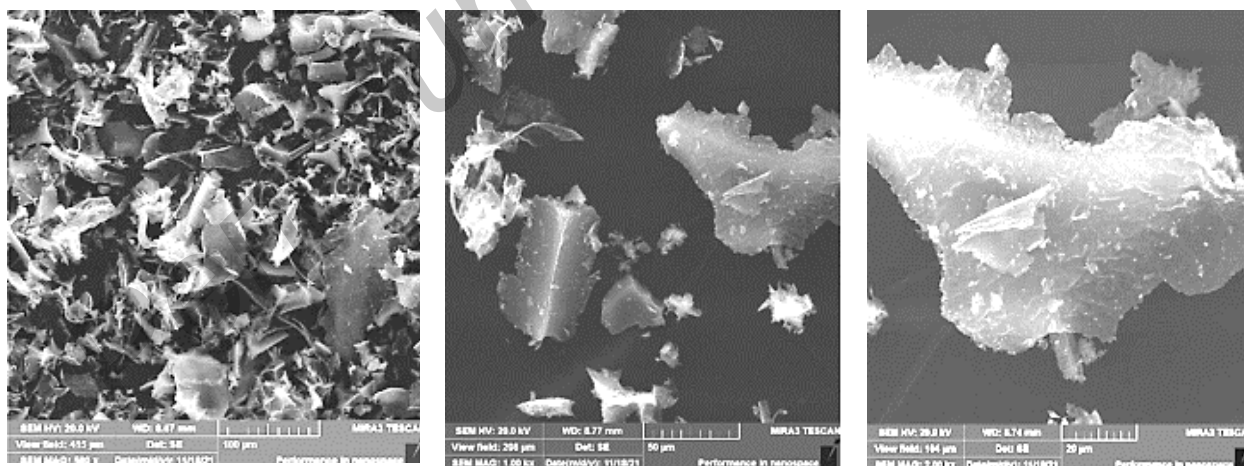


Рисунок 12. — Морфология агломератов МС, полученных СВС-методом из крахмалас процентным содержанием исходного материала к горючему веществу (мас. %) 30 : 70 при различных разрешениях растрового электронного микроскопа

Таким образом, модифицирование полиэфирных покрытий МС, сформированных на алюминиевом сплаве, приводит к снижению значений УПЭ до 29,3...29,5 мДж / м² при концентрации модификатора 0,1 и 0,5 мас. %, увеличению значений УПЭ до 31,0...31,5 мДж / м² при концентрациях МС 1 и 3 мас. %, росту значений дисперсионного компонента до 10,8...11,9 мДж / м² при малых концентрациях и последующему снижению до уровня исходного (8,8...8,6 мДж / м²) при 1...3 мас. % МС в композиционных покрытиях. Снижение значения полярного компонента УПЭ с 27,0 до 17,4...18,6 мДж / м² происходит при концентрациях МС в покрытии 0,1...0,5 мас. % и частичному восстановлению до 22,2...22,9 мДж / м² при более высоких концентрациях. Минимальная поверхностная энергия достигается при 0,5 мас. % МС (29,34 мДж / м²). Увеличение значений УПЭ при 1 и 3 мас. % может быть связано с неоднородностью покрытия, его дефектностью или изменением ориентации молекул полиэфирной матрицы при введении МС в структуру покрытия на поверхности сплава алюминия. Тем не менее все значения удельной поверхностной энергии композиционного покрытия ниже, чем без покрытия, что подтверждает гидрофобизирующий эффект.

Низкоуглеродистая сталь без покрытия имеет самую высокую гидрофобность среди исходных исследуемых подложек (угол смачивания водой — 75,0°, глицерином — 83,4°), однако значения УПЭ 34,92 мДж / м² наиболее близки к алюминиевому сплаву. Влияние МС на свойства полиэфирных покрытий, сформированных на стали 08кп, выражены достаточно неоднозначно: значения угла смачивания глицерином снижаются с 83°24' до 73°12'...79°56', что указывает на улучшение смачивания неполярной жидкостью композиционного покрытия, особенно при концентрации модификатора 3 мас. % (значения краевого угла смачивания — 73°12'). В случае смачивания покрытия водой при концентрации модификатора 0,1...0,5 мас. % значение возрастает до 76,2...78,7°, затем при 1 мас. % резко снижается до 72,0°, а при 3 мас. % снова увеличивается до 75°48'. Работа адгезии композиционного покрытия к глицерину растёт со значений 70,7 мДж до 74,5...81,7 мДж, достигая максимума при концентрации 3 мас. % МС (81,7 мДж). Работа адгезии к воде изменяется нелинейно, снижаясь до значений 87,1...90,1 мДж при концентрации модификатора 0,1...0,5 мас. % и 3 мас. %, но возрастает до значений 95,3 мДж при концентрации МС 1 мас. %. Исходя из полученных данных, возможно предположить, что исходный образец стали 08кп характеризуется низкими значениями дисперсионной составляющей (0,77 мДж / м²) и высокими параметрами полярной составляющей УПЭ (5 мДж / м²), что характерно для поверхности, покрытой оксидными плёнками, значения УПЭ находятся в области 34,92 мДж / м². Таким образом, введение МС в состав полиэфирного покрытия приводит к снижению значений УПЭ до 28,4...28,3 мДж / м² при концентрации модификатора 0,1 и 0,5 мас. % и до 28,3 мДж / м² при 3 мас. %, резкому возрастанию значения УПЭ до 34,76 мДж / м² при концентрации 1 мас. % малослойных ГПС, что практически соответствует исходному значению, росту дисперсионного компонента до 5,15 и 4,71 мДж / м² при малых концентрациях, затем снижению значений до 2,19 мДж / м² при концентрации модификатора 1 мас. % и затем дальнейшему увеличению значений до 9,10 мДж / м² при концентрации модификатора 3 мас. %. Полярный компонент УПЭ снижается при концентрации МС в составе покрытия при 0,1...0,5 мас. % полярного компонента с 34,15 до 23,3...21,9 мДж / м² при 0,1...0,5 %, затем увеличивается до 32,6 мДж / м² при концентрации 1 мас. % и снижается до 19,2 мДж / м² при 3 мас. %.

Такой характер изменений параметров УПЭ свидетельствует о немонотонном изменении зависимости свойств покрытия от концентрации МС, сформированных на стали 08кп. Вероятно, при 1 мас. % происходит перестройка структуры покрытия (возможно образование агрегатов или неполное смачивание подложки), что возвращает поверхностные свойства к исходным покрытиям. При 3 мас. % покрытие становится более однородным, поверхностная энергия вновь снижается до значений, характерных для гидрофобизированных поверхностей. Исходя из полученных данных, можно констатировать, что наибольший модифицирующий эффект введение МС в состав полиэфирных покрытий оказывает при формировании данного типа покрытий на стальной подложке 12Х18Н10Т. Исходная металлическая поверхность обладает самыми высокими значениями полярной составляющей УПЭ

и практически нулевой дисперсионной составляющей. При концентрации 0,1 мас. % МС в покрытии значения полярной составляющей снижаются почти вдвое, а дисперсионная составляющая возрастает на порядок. Удельная поверхностная энергия уменьшается на 20...25 % и стабилизируется в диапазоне 29...32 мДж / м². Оптимальной концентрацией с точки зрения минимизации значений УПЭ при высоких эксплуатационных характеристиках является концентрация модификатора в области 1 мас. %. На алюминиевом сплаве АМг1 эффект от применения МС в полиэфирном покрытии менее выражен. Значения УПЭ ниже, чем у коррозионностойкой стали, снижение составляет около 15...17 %. Однако наблюдается обратная зависимость при концентрациях выше 0,5 мас. %: значения УПЭ начинают увеличиваться, что может быть обусловлено особенностями адгезионного взаимодействия композиционного полиэфирного покрытия на оксиде алюминия, склонностью к образованию островковых структур (областей с повышенным молекулярным упорядочением в структуре матрицы полиэфирного покрытия) или конкурирующим процессом, происходящим между хемосорбцией и физической адсорбцией при образовании покрытия на поверхности алюминиевого сплава. Изменение поверхностных свойств композиционного полиэфирного покрытия, полученного на стали 08кп, носит немонотонный характер. Минимумы значений УПЭ наблюдаются при 0,5 и 3 мас. %, а при 1 мас. % значения возвращаются к исходным. Это может указывать на формирование покрытия, имеющего поры и полтрузии. Увеличение концентрации модификатора до 3 мас. % позволит сформировать сплошное и гидрофобное покрытие. Во всех случаях увеличение угла смачивания водой сопровождается снижением значений полярной составляющей УПЭ. Для глицерина данная связь менее однозначна: на стали 12Х18Н10Т угол смачивания глицерином уменьшается при росте дисперсионной составляющей, что объясняется улучшением дисперсионного взаимодействия. На алюминии угол смачивания глицерином, напротив, возрастает, несмотря на некоторое увеличение значений неполярной составляющей УПЭ. Это может быть связано с изменением топографии поверхности или с тем, что на алюминии преобладает влияние полярной компоненты даже при её снижении. Полученные данные показывают, что введение МС позволяет целенаправленно изменять энергетические характеристики композиционных покрытий. Для всех трёх типов исследуемых подложек удаётся снизить поверхностную энергию на 15...30 %, причём основной вклад вносит уменьшение полярной составляющей. Это важно для создания защитных покрытий с низкой адгезией к полярным средам (например, для антикоррозионной защиты или придания водоотталкивающих свойств). Оптимальная концентрация ГПС зависит от типа металла: для нержавеющей стали — 1 мас. %, алюминиевого сплава — 0,5 мас. %, низкоуглеродистой стали — 0,5 или 3 мас. %.

Заключение. В ходе проведенных исследований методом краевого угла смачивания по изучению поверхностных характеристик композиционных покрытий на основе полиэфирных соединений, модифицированных МС, установлены значения поверхностной энергии металлических подложек 12Х18Н10Т, АМг1 и 08кп, а также покрытий, содержащих МС с концентрацией 0,1...3,0 мас. %. Исходные подложки характеризуются высокой полярной составляющей поверхностной энергии (27...39 мДж / м²) и низкой дисперсионной (0,8...8,3 мДж / м²). Наиболее полярной является сталь 12Х18Н10Т, наименее — алюминиевый сплав АМг1. Введение МС в полиэфирное покрытие приводит к снижению значений УПЭ для всех типов подложек. Максимальное снижение (до 28,9 мДж / м²) зафиксировано для стали 12Х18Н10Т при 1 мас. % МС. Для АМг1 минимальная энергия (29,3 мДж / м²) достигается при 0,5 мас. %, для стали 08кп — при 0,5 и 3 мас. % (26,6...28,3 мДж / м²). Изменение энергетических характеристик обусловлено главным образом уменьшением полярной составляющей и возрастанием дисперсионной, что свидетельствует о гидрофобизации поверхности. Обнаружены немонотонные изменения зависимостей значений УПЭ композиционных полиэфирных покрытий от концентрации модификатора, сформированных на подложках АМг1 и 08кп,

указывающие на возможные структурные перестройки покрытия при увеличении концентрации ГПС выше 0,5...1,0 мас. %. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации состава защитных покрытий, предназначенных для снижения адгезии к полярным жидкостям и повышения коррозионной стойкости металлов.

Список цитируемых источников

1. Физико-механические характеристики нанокomпозиционных покрытий, формируемых методом электроискрового легирования / В. В. Михайлов [и др.] // *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6 : Тэхніка.* — 2019. — Т. 9, № 2. — С. 45—53.
2. Физико-механические характеристики жаростойких покрытий на основе Al-Ti-N / Н. М. Чекан [и др.] // *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6 : Тэхніка.* — 2014. — № 1 (169). — С. 95—102.
3. Овчинников, Е. В. Формирования тонкопленочных покрытий при воздействии технологических факторов / Е. В. Овчинников // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения : Междунар. сб. науч. тр. / ДонНТУ.* — Донецк : ДонНТУ, 2013. — С. 197—205.
4. Овчинников, Е. В. Полиэфирные нанокomпозиционные покрытия / Е. В. Овчинников, С. О. Лях, Е. В. Серко // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 24—25 апр. 2025 г.* — Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2025. — С. 145—146.
5. Износостойкие полиэфирные покрытия для строительных конструкций / Е. В. Овчинников [и др.] // *Наука и инновации в строительстве : сб. докл. IX Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 15 апр. 2025 г.* — Белгород : БГТУ, 2025. — С. 277—282.
6. Реактопластичные графенсодержащие композиционные материалы / Е. В. Овчинников [и др.] // *Горная механика и машиностроение.* — 2025. — № 3. — С. 66—74.
7. Лях, С. О. Антифрикционные полимерные покрытия для строительных изделий / С. О. Лях, Е. В. Серко, Е. А. Тарасюк ; науч. рук. Е. В. Овчинников // *Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения : сб. материалов IX Междунар. науч. конф. молодых ученых, Гродно, 30 мая 2025 г. / Гродн. гос. ун-т им. Янки Купалы ; отв. ред. Д. А. Линник ; редкол.: Д. А. Линник [и др.].* — Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2025. — С. 785—791.
8. Триботехнические характеристики фотополимерных материалов, модифицированных графеновыми наночастицам / Е. И. Эйсымонт [и др.] // *Горная механика и машиностроение.* — 2025. — № 1. — С. 78—89.
9. Графеновые наноматериалы: структура, свойства, применение / Е. В. Овчинников [и др.] // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 24—25 апр. 2025 г.* — Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2025. — С. 19—24.
10. Графенсодержащие композиционные смазочные материалы / А. П. Возняковский [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 2 кн.* — Мн. : ФТИ НАН Беларуси, 2024. — Кн. 1 : Материаловедение. — С. 145—152.

Поступила в редакцию 06.04.2026.