

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

А.В. Рогачёв¹, М.А. Ярмоленко¹, А.А. Рогачёв², Цзян Сяо Хун³

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Институт химии новых материалов НАН Беларуси, Минск

³Нанкинский университет науки и технологии

MAIN RESULTS AND PROSPECTS OF FORMING FUNCTIONAL NANOCOMPOSITE POLYMER COATINGS FROM THE ACTIVE GAS PHASE

A.V. Rogachev¹, V.A. Yarmolenko¹, A.A. Rogachev², Jiang Xiao Hong³

¹Francisk Skorina Gomel State University

²Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

³Nanjing University of Science and Technology

Аннотация. Проведен анализ закономерностей протекания основных стадий нанесения композиционных полимерных покрытий из активной газовой фазы, генерируемой электронно-лучевым диспергированием. В качестве основных наиболее эффективных применений данного метода отмечаются формирование покрытий медицинского назначения, слоев с высокими гидрофобными и гидрофильными свойствами, а также антифрикционных покрытий для прецизионных узлов трения. Основываясь на преимуществах метода осаждения покрытий из газовой фазы, предложен ряд других перспективных его применений для решения широкого круга технологических задач.

Ключевые слова: полимерные покрытия, электронно-лучевое диспергирование, покрытия медицинского назначения, гидрофобные покрытия, антифрикционные покрытия.

Для цитирования: Основные результаты и перспективы формирования функциональных нанокomпозиционных полимерных покрытий из активной газовой фазы / А.В. Рогачёв, М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачёв, Цзян Сяо Хун // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 3 (64). – С. 29–36. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_3_64_29. – EDN: VGMOLJ

Abstract. The analysis of the regularities of the main stages of applying composite polymer coatings from the active gas stage generated by electron-beam dispersion is carried out. The most effective applications of this method are the formation of medical coatings, layers with high hydrophobic and hydrophilic properties, as well as antifriction coatings for precision friction units. Based on the advantages of the method of deposition of coatings from the gas phase, a number of other promising applications are proposed for solving a wide range of technological problems.

Keywords: polymer coatings, electron-beam dispersion, medical coatings, hydrophobic coatings, antifriction coatings.

For citation: Main results and prospects of forming functional nanocomposite polymer coatings from the active gas phase / A.V. Rogachev, V.A. Yarmolenko, A.A. Rogachev, Jiang Xiao Hong // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2025. – № 3 (64). – P. 29–36. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_3_64_29 (in Russian). – EDN: VGMOLJ

Введение

Тонкие нанокomпозиционные полимерные покрытия имеют широкую сферу практического применения. Они используются не только для поверхностного модифицирования различных материалов с целью повышения их адсорбционных, защитных, электрофизических, антифрикционных свойств, но и в качестве активных функциональных элементов различных устройств сенсорики, микроэлектроники, оптоэлектроники, медицинских препаратов. В числе методов, применяемых для осаждения таких покрытий, в настоящее время активно разрабатываются и находят эффективное практическое применение для генерации газовой фазы и ее

активации технологические приемы с использованием плазменных, электронно-лучевых, лазерных потоков [1]–[3]. Анализ особенностей реализации таких методов свидетельствует о значительной перспективности применения электронно-лучевого диспергирования. Технологическое осуществление данного метода имеет ряд сложностей, однако в сравнении с другими методами диспергирования реализуется ряд преимуществ, в числе которых возможность активации образовавшихся летучих продуктов, проведение дополнительной обработки растущего слоя вторичными электронами, изменение в широких пределах его молекулярной структуры и морфологии.

Сложные физико-химические процессы протекают и на стадии переноса летучих продуктов в газовой фазе, их адсорбции на поверхности с последующим участием в образовании макромолекул и надмолекулярных структур. Закономерности протекающих процессов в значительной степени зависят не только от условий и режимов диспергирования, но и в значительной степени определяются природой, химическим составом диспергируемого вещества.

Решение проблемы создания тонкопленочных материалов, покрытий с заданным составом и структурой возможно только при реализации комплексных эффективных технологических методов и приемов на всех стадиях их формирования. Основной целью настоящей работы является анализ основных процессов, протекающих при осаждении покрытий из газовой фазы, определение особенностей формирования ряда функциональных покрытий и наиболее перспективных направлений практического применения газозащитного синтеза наноконпозиционных слоев.

1 Закономерности генерации газовой фазы диспергированием и осаждения покрытия

При воздействии потока электронов на полимерную мишень протекают процессы ее зарядки, радиационно-термического воздействия на макромолекулы полимера, приводящей их деструкции с образованием низкомолекулярных фрагментов с различной активностью и последующей их десорбцией. Параметры данных процессов изменяются в процессе диспергирования, что определяет в значительной степени нестационарный характер диспергирования, изменяющуюся в процессе диспергирования реакционную активность летучих продуктов [1].

В [4], [5] рассмотрены особенности переноса заряда при электронно-лучевом диспергировании полимеров. Предложена модель, учитывающая изменение адсорбированного заряда за счет вторичной электронной эмиссии, десорбции заряженных частиц диспергирования. Показано, что при достаточно длительном диспергировании величина ускоряющего напряжения электронной пушки практически не влияет на скорость диспергирования. При проведении электроннолучевого диспергирования в условиях лазерного ассистирования вследствие имеющей место фотоэлектронной эмиссии зарядка поверхности снижается, и при повышении плотности мощности излучения регистрируется практически линейное возрастание давления летучих продуктов диспергирования, а, соответственно, и скорости роста покрытия [5]. Результаты аналитического рассмотрения согласуются с данными экспериментальных исследований зависимости скорости диспергирования от плотности потока электронов [2], [6] и являются обоснованием условий и режимов наиболее эффективных

технологических приемов снижения зарядки поверхности, повышения реакционной активности летучих продуктов диспергирования, в числе которых использование для обработки оптимизированных по энергии потоков электронов, проведение процесса в условиях лазерного ассистирования, создание в газовой фазе электрических разрядов, введение в состав мишени функциональных наполнителей.

С целью оценки влияния теплового воздействия потока электронов на процессы генерации летучих продуктов электроннолучевого диспергирования расчетными на основании уравнения теплового баланса при квазиравновесном режиме диспергирования и экспериментальными методами определены значения максимальной температуры в зоне действия потока электронов. Установлено, что ее значение недостаточно для образования летучих продуктов термодеструкции. Так, при диспергировании ПТФЭ потоком электронов с $U = 2,3$ кэВ и $j = 4,6$ А/м² максимальная температура не превышает 665 К. Нагрев полимера в тигле до такой температуры в условиях вакуума не вызывает экспериментально наблюдаемую скорость изменения массы. Кроме этого в [7] отмечается, что при нагреве ПТФЭ в интервале температур 700–1000 К процесс термодеструкции идет с почти 100% выходом мономера и осаждение покрытия не происходит. По данным работы [8] только нагрев до температуры 1300–1400 К приводит к образованию конденсированного слоя при осаждении летучих продуктов термодеструкции. Таким образом, тепловой механизм электроннолучевого диспергирования не является доминирующим. Отметим также, что распыление твердой мишени потоком электронов является также маловероятным, так как масса электронов значительно меньше массы атомов и значение передаваемой при столкновении энергии имеет достаточно малую величину.

На основании результатов данного рассмотрения и с учетом данных о пространственном распределении летучих продуктов, зависимости их плотности от условий и режимов диспергирования [9] в качестве наиболее реального объяснения кинетических особенностей процесса диспергирования полимерных, органических материалов предлагается модель, учитывающая значительный вклад эффекта анафореза, в соответствии с которой образование летучих продуктов в результате реализации следующих основных актов:

- нагрев материала мишени и протекание процессов термо- и электронно-стимулированной деструкции макромолекул, сложных органических соединений, приводящих к образованию в поверхностном слое относительно низкомолекулярных фрагментов;

- зарядка поверхности и находящихся на ней образовавшихся молекулярных фрагментов;

– генерация летучих продуктов, осуществляемая в результате термодесорбции, активированной электростатическим взаимодействием отрицательно заряженных поверхности и молекулярных фрагментов.

Сложные процессы, зависящие от природы полимеры, состава и плотности потока летучих продуктов, протекают и на поверхности при формировании покрытия. На основании анализа морфологических особенностей осаждаемых покрытий, из молекулярной структуры установлено, что в зависимости от природы полимера, режимов диспергирования рост покрытий осуществляется по следующим двум основным механизмам:

1) адсорбционно-полимеризационному, включающему в качестве основных стадий адсорбцию летучих продуктов диспергирования на поверхности и их вторичную полимеризацию;

2) аэрозольному (капельному): образование на стадии диспергирования или же в результате полимеризации в газовой фазе микро- и/или наночастиц полимера и их закрепление на поверхности.

Адсорбционно-полимеризационный механизм осаждения реализуется при протекании на поверхности, например, процессов радиационно-стимулированной полимеризации с участием адсорбированных фрагментов при осаждении из относительно низких плотности потоков продуктов диспергирования и концентрации активных частиц в потоке, при которой выполняется соотношение $l_k < \lambda$ (l_k – характерный размер камеры, λ – длина свободного размера фрагментов) [2].

Аэрозольный механизм проявляется при образовании потоков диспергирования, характеризующихся высокими плотностью и реакционной способностью (например, вследствие наличия в нем долгоживущих радикалов). Установлено, что объем образовавшихся частиц полимера зависит от соотношения плотностей активных и неактивных частиц в газовой фазе и наиболее значительное его изменение имеет место вблизи зоны диспергирования. Процессы газовой полимеризации могут активно протекать и в поверхностном слое диспергируемого полимера в процессе его обработки концентрированным потоком энергии, когда наблюдается образование в объеме мишени включений из летучих продуктов разрушения.

Особый научный и практический интерес представляет использование метода диспергирования для получения композиционных полимер-полимерных и наполненных неорганическими наночастицами пленочных материалов. Формирование таких систем возможно путем одновременного или последовательно проводимого диспергирования исходных веществ и осаждения летучих продуктов на поверхности. В первом случае формируются покрытия с равномерным

по толщине слоя распределением частиц, во втором – многослойное покрытие. При этом, изменяя условия и режимы диспергирования, пленкообразования, предоставляется возможность регулирования в широких пределах структуры материала а, соответственно, и их свойств.

Анализ физико-химических процессов, протекающих при осаждении конденсированных слоев из активной газовой фазы, генерируемой электроннолучевым, лазерным диспергированием, позволяют рассматривать их как отдельный, характеризующий существенными особенностями метод синтеза конденсированных слоев, химический состав, структура которых, как правило, отличается от материала мишени. При его реализации возможно осаждение покрытий различного состава и конструкции, не достижимых другими методами, что в значительной степени определяет широкие перспективы их практического применения.

2 Молекулярная структура и свойства покрытий медицинского назначения

Антибактериальные покрытия стали важным инструментом в борьбе с инфекциями бактериальных патогенов благодаря их способности улучшать соблюдение пациентом режима лечения и их возможности персонализации. Они наряду с гидрогелями [10], функциональными марлевыми повязками [11], специальными пенами [12] активно используются для лечения различных типов ран. В последние годы особое внимание уделяется разработке и проектированию систем длительного, контролируемого высвобождения лекарств. Биопленочные материалы на основе полисахаридов, белков и липидов имеют большие преимущества при их использовании в качестве скаффолда для доставки лекарств. В их числе гидроксипропилцеллюлоза (ГЭЦ), производное целлюлозы, обладает хорошей гидрофильностью из-за замены гидроксильных групп на гидроксипропильные, имеет молекулярную массу около 90 кДа, не содержит функциональных групп со значительными положительными или отрицательными зарядами в своей молекулярной структуре, совместима с другими материалами и обладает превосходной способностью к образованию пленки с хорошей биосовместимостью и биоразлагаемостью [13]. Эти свойства не только делают ГЭЦ отличным кандидатом на роль носителей лекарств, но и определяют высокий потенциал их использования в других практических приложениях, в частности, в энергетических материалах, где полимерные матрицы выполняют функцию связующих для стабилизации энергетических частиц, регулирования характеристик горения и улучшения механических свойств.

Достаточно подробная информация об эффективности применения методов нанесения из активной газовой фазы, генерируемой электрон-

но-лучевым диспергированием полимеров и испарением низкомолекулярных соединений, для формирования многокомпонентных с регулируемым пролонгированным действием биопокрытий приведена в [14].

Выбор электронно-лучевого диспергирования для формирования таких покрытий обусловлен возможностью осаждения однородных, высокочистых и высокоплотных пленок. Метод не требует использования жидких сред, подложка не подвергается термическому воздействию во время процесса осаждения и в качестве подложки может использоваться любой материал, включая металлы и полимерные органические соединения. Данная технология позволяет реализовать возможность точного, контролируемого осаждения слоистых материалов, что является важным при нанесении в едином технологическом цикле покрытий с заданным распределением в его объеме наноразмерных частиц функционального наполнителя и, соответственно, параметрами пролонгированного действия.

Реализация идеи пролонгированного, регулируемого освобождения лекарственного препарата или другого функционального агента возможна только при формировании многокомпонентных покрытий, содержащих строго определенные функциональные ингредиенты. В качестве такого покрытия в [15] предлагается трехслойная композиционная система, содержащая гидроксиэтилцеллюлозу, поликапролактон, норфлоксацин и куркумин, осаждение которой в едином технологическом цикле возможно только с использованием развиваемого метода электронно-лучевого диспергирования при режимах, исключающих значительное изменение молекулярной структуры исходных соединений.

В качестве основы покрытия выбрана гидроксиэтилцеллюлоза – многофункциональный полимер, сетчатая структура и способность удерживать воду дают ему большое преимущество в медицинских материалах. Помимо биомедицинских применений такие покрытия имеют общие фундаментальные характеристики с другими полимерными связующими и матрицами, используемыми в энергетических материалах, где стабильность материала играет решающую роль в оптимизации производительности. Поликапролактон (PCL) – это биосовместимый полимер, одобренный Управлением по контролю за продуктами и лекарствами США и обладающий такими характеристиками, как длительное время биоразложения, хорошая биосовместимость и механические свойства, среди которых его длительное разложение делает его выгодным для пролонгированной доставки лекарств. Способность PCL образовывать стабильные полимерные сети также предполагает его актуальность в энергетических приложениях, где полимерные компоненты влияют на контроль скорости горе-

ния и термическую стабильность. Норфлоксацин эффективно используется против грамположительных и грамотрицательных микроорганизмов, включая *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Campylobacter*, *Vibrio cholerae* и *Shigella*. В настоящее время он часто применяется в качестве антибактериального средства в перевязочных материалах для ран.

Важное практическое применение имеет синтезированное в [16] многослойное покрытие на основе кремнийорганических полимеров, Mg, CaH₂, Zn и фосфорсодержащих соединений, важной особенностью которого является высокая сорбция влаги и его трансформация в биологических средах в гидроксипатит.

Полученные результаты использованы также при отработке технологии нанесения покрытий биотина на поверхность титановых имплантатов [17]. Установлено, что молекулярная структура монослоя биотиновой пленки полностью соответствует молекулярной структуре исходных биотиновых порошков, при этом она проявляет хорошую гидрофильность, превосходную биосовместимость и биобезопасность.

Электроннолучевое диспергирование многокомпонентных мишеней является эффективным технологическим приемом формирования антибактериальных покрытий с целью снижения воспаления в местах имплантации контаминированных спиц в мягких тканях. Высокую эффективность проявляют многокомпонентные покрытия, в которых в качестве полимерной матрицы выступают полиуретан, биосовместимый и биodeградируемый полилактид, а в качестве биоцидных компонентов – ципрофлоксацин и наночастицы серебра [18].

3 Покрытия с заданными адсорбционными свойствами

Высокая перспективность применения электроннолучевого диспергирования для создания гидрофильных или гидрофобных слоев проиллюстрирована на примере осаждения покрытий на основе кремнийорганических полимеров [19]. Показано, что изменяя состав покрытия и используя методы активационной обработки представляется возможным изменения адсорбционных свойств в пределах от гидрофильных (при проведении плазменной обработки) до супергидрофобных (при введении в кремнийорганическую смолу галогенсодержащих полимеров, магния). Перспективными гидрофобными покрытиями являются однокомпонентные и композиционные слои на основе политетрафторэтилена [3].

В [20] показана высокая эффективность нанесения полимерных покрытий с использованием радиационно-термоэлектростатической активации процессов генерации летучих продуктов при формировании трековой мембраны из

полиэтилентерефталата с осажденным на ее поверхности слоем поливинилхлорида. Показано, что в процессе модифицирования происходит образование композиционных мембран, состоящих из двух слоев, одним из которых является исходная мембрана, характеризующаяся наличием на поверхности концевых карбоксильных групп и имеющая средний уровень гидрофильности. Угол смачивания по воде для этого слоя составляет 65° . Второй осажденный слой имеет гидрофобную природу, величина угла смачивания которого в среднем составляет 93° . Мембраны подобного образца могут быть использованы в процессах опреснения морских вод методом мембранной дистилляции.

Предлагаемый метод проявил высокую эффективность и при нанесении на поверхность трековых мембран ПЭТФ покрытий ксаметилдисиладана, гексаметилдисилоксана и 1, 1, 1, 2-тетрафторэтана, а также сверхвысокомолекулярного полиэтилена [21]. Установлено, что нанесение покрытий на поверхность трековых мембран ПЭТ методом электронно-лучевого диспергирования полимеров в вакууме приводит к формированию биполярных композитных мембран, имеющих асимметричную форму пор: диаметр пор на необработанной стороне мембраны не изменяется, а на модифицированной уменьшается. При этом нанесение полимерных покрытий вызывает образование шероховатости, значение которой возрастает с увеличением толщины покрытия. Так, при формировании покрытия ПТФЭ толщиной 100 нм значение R_{ms} составляет 9,6 нм, а при толщине покрытия 300 нм шероховатость поверхности увеличивается и становится равной 16,4 нм.

В [22] изучена стабильность гидрофобных свойств покрытий с морфологически развитой (текстурированной) поверхностью, полученных из политетрафторэтилена и сверхвысокомолекулярного полиэтилена при хранении, а также при длительном контакте с водой и водными растворами хлорида натрия с концентрацией от 5 до 15 г/л. Данные покрытия наносились на поверхность полиэтилентерефталатной трековой мембраны методом электронно-лучевого осаждения исходных полимеров в вакууме с целью получения композиционных мембран для опреснения воды. Установлено, что покрытия на основе политетрафторэтилена под воздействием реальных условий окружающей среды имеют тенденцию к старению и постепенно теряют свои гидрофобные свойства. Угол смачивания водой таких покрытий уменьшается в среднем на 30° при хранении образцов композитных мембран в течение 5 лет. Это составляет 23% от исходного значения. Уменьшение угла смачивания покрытий данного типа обусловлено переходом от гетерогенного режима смачивания к гомогенному, причиной чего является образование на их поверхности

адсорбционного слоя воды. Напротив, для покрытий сверхвысокомолекулярного полиэтилена краевой угол смачивания водой практически не изменяется в процессе хранения образцов мембран. Исследование стабильности полимерных покрытий при длительном контакте композитных мембран с водой и водными растворами хлорида натрия показало, что покрытия сверхвысокомолекулярного полиэтилена устойчивы как в воде, так и в водных растворах хлорида натрия. Покрытия политетрафторэтилена более устойчивы к воздействию водно-солевых растворов, чем воды.

4 Покрытия триботехнического назначения

Перспективным и достаточно эффективным методом повышения триботехнических свойств поверхностей является нанесение на них тонких многослойных и композиционных покрытий на основе полимеров из летучих продуктов диспергирования. Такие покрытия позволяют реализовать правило положительного градиента механических свойств и получить триботехнические сопряжения с минимальными значениями износа и коэффициента трения. При нанесении покрытий представляется возможность также одновременного улучшения защитных, антикоррозионных свойств поверхностей трения, расширения диапазона рабочих температур. Эти преимущества реализованы, в частности, при проведении поверхностного модифицирования резинотехнических изделий [3], [23]. Установлено, что существенное влияние на триботехнические и адсорбционные свойства модифицированных РТИ оказывает метод и режим предварительной активационной обработки. Для обработанных бутадиен-нитрильных резин наиболее высокие эксплуатационные свойства проявляются при проведении предварительной обработки в плазме тлеющего разряда. Особенно значимым эффектом повышения триботехнических свойств достигается при осаждении многослойных и комбинированных покрытий на основе ПУ и ПТФЭ. Модифицированные резины в сравнении с необработанными меньше (в 3–6 раз) набухают в жидких углеводородных средах и имеют более высокую (в 3–6 раз) долговечность. Объемные свойства РТИ (прочность, твердость, удлинение при разрушении, морозостойкость и другие) после нанесения полимерного покрытия практически не изменяются. При этом установлен сложный характер зависимости триботехнических свойств от толщины покрытия, обусловленный протеканием в тонких слоях при его толщине, большей критической, процессов объемного структурообразования. Отмечается, что при трении модифицированных резин низкие значения коэффициента трения и скорости изнашивания наблюдаются при толщине изношенного слоя, значительно

превосходящей толщину нанесенного покрытия, что можно объяснить, с одной стороны, глубоким проникновением активных, способных к прививке частиц в объем пористой резины и, с другой, протеканием процессов образования модифицированных фторсодержащих структур.

5 Перспективные применения нанесения функциональных покрытий из активной газовой фазы

В числе наиболее перспективных технологических направлений применения функциональных полимерных покрытий, осажденных из активной газовой фазы, генерируемой методами электроннолучевого, лазерного диспергирования, следует отметить следующие:

1. Дальнейшая разработка физико-химических и технологических основ формирования биоразлагаемых материалов на основе наноразмерных полимерных систем и лекарств, обладающих комплексом антибактериальных, адсорбционных свойств и проявляющих заданное пролонгированное действие, а также исследование их структуры, физико-химических и физико-биологических свойств.

2. Разработка физико-химических основ модифицирования электродных материалов источников тока с использованием наноконпозиционных слоев на основе проводящих полимеров, установление влияния условий и режимов синтеза на морфологию, молекулярную структуру и электрофизические свойства осажденных полимерных слоев, электрохимические свойства ионных источников с модифицированными электродами. Модифицирование электродов с использованием проводящих полимерных слоев (полианилина) проводится с целью повышения эксплуатационных характеристик аккумуляторов, снижения электрического сопротивления электродов, степени их деградации при эксплуатации. При этом использование растворных технологий весьма ограничено, так как этим методом невозможно формирование сплошных наноразмерных слоев и ряд проводящих полимеров не растворяются и их легирование затруднено.

3. Исследование процессов и разработка физико-химических основ формирования из активной газовой фазы электрохромных наноконпозиционных покрытий на основе полианилина и оксидов металлов, методов их допирования другими проводящими полимерами, определение их молекулярной структуры, электрофизических и оптических свойств. Предлагаемый метод нанесения таких покрытий снимает ограничения по их химическому составу, позволяет значительно расширить функциональные свойства.

4. Развитие научных и технологических основ нового метода синтеза гибридных полимернеорганических полупроводниковых материалов на основе наносистем, инкорпорированных

полупроводниковыми соединениями для создания элементной базы отечественной микроэлектроники, ИК-оптики и фотоники, в частности, для создания матриц, проявляющих пьезоэлектрические свойства.

5. Установлено, что при диспергировании ряда полимеров протекают процессы карбонизации и осаждаемые из активной газовой фазы микро-, наноконпозиционные полимер-полимерные покрытия в зависимости от природы полимеров, условий и режимов диспергирования могут представлять собой различные морфологические структуры в диапазоне от высокодисперсных смесей компонентов мишени до специфических композиционных структур, фазовый и химический состав которых отличается от состава исходных полимеров. В связи с этим особый интерес представляет изучение процессов карбонизации полимеров при использовании в качестве материала мишени полимеров и соответствующих катализаторов. Использование составных мишеней, последовательное или одновременное диспергирование полимеров, нагрев и даже испарение низкомолекулярных соединений различной природы в значительной степени определяют природу и механизм протекающих на всех стадиях нанесения покрытий физико-химических процессов.

Так, в [24] показано, что при диспергировании полиэтилена, поливинилхлорида в присутствии катализаторов осаждаются карбонизированные слои различной морфологии, которые могут найти эффективное применение в качестве армирующих элементов композиционных систем, матриц антибактериальных покрытий с пролонгированным высвобождением антибактериальных препаратов, придания поверхности гидрофобных или гидрофильных свойств.

Таким образом, осаждение органических, в том числе и полимерных слоев и композиционных покрытий на их основе из газовой фазы, образованной электронно-лучевым диспергированием исходных веществ в вакууме, является достаточно перспективным методом синтеза функциональных материалов. В зависимости от природы диспергируемых веществ, условий и режимов процесса генерации газовой фазы и осаждения продуктов диспергирования возможно формирование конденсированных слоев с различной морфологией, молекулярной структурой. Дальнейшее развитие методов формирования таких покрытий может быть связано с реализацией условий и режимов, при которых на границе раздела фаз протекают процессы химического взаимодействия.

Следует отметить, что данный метод синтеза перспективен и при решении других технических задач и в процессе дальнейшего его изучения будут определены новые эффективные приемы управления структурой и свойствами формируемых слоев.

Выводы

Обобщены и синтезированы результаты исследования основных стадий при формировании композиционных полимерных покрытий из активной газовой фазы; особенности генерации летучих продуктов методом электронно-лучевого диспергирования; процессы адсорбции и формирования слоев. Отмечается, что данный метод следует рассматривать как отдельный, характеризующийся существенными особенностями и проявляющий в сравнении с другими ряд преимуществ. Наиболее эффективное проявление особенностей данного метода установлено при формировании антибактериальных покрытий на имплантаты, перевязочные материалы, реализующие эффект пролонгированного эффективного действия, а также при лечении костных повреждений. В качестве эффективного применения данного метода отмечается также формирование покрытий с высокими гидрофобными и гидрофильными свойствами, с целью модифицирования мембран. На примере модифицирования резиновых изделий показано, что нанесение тонких композиционных полимерных покрытий позволяет получить триботехнические сопряжения с минимальными значениями износа и коэффициента трения, а также антифрикционных покрытий для прецизионных узлов трения. Основываясь на преимуществах метода осаждения покрытий из газовой фазы, предложен ряд других перспективных его применений для решения широкого круга технологических задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ткачук, Б.В. Получение тонких полимерных пленок из газовой фазы / Б.В. Ткачук, В.М. Колотыркин. – Москва: Химия, 1977. – 216 с.
2. Рогачев, А.А. Физико-химия полимерных покрытий, осаждаемых из активной газовой фазы / А.А. Рогачев. – Москва: Научный мир, 2014. – 287 с.
3. Микро- и нанокмпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые из активной газовой фазы / М.А. Ярмоленко [и др.]; под ред. А.В. Рогачева. – Москва: Радиотехника, 2016. – 424 с.
4. Казаченко, В.П. Закономерности диспергирования политетрафторэтилена потоком электронов средних энергий / В.П. Казаченко, А.В. Рогачев // Химия высоких энергий. – 1999. – Т. 33, № 4. – С. 270–273.
5. Особенности кинетики электронно-лучевого диспергирования полимеров в условиях лазерного ассистирования / М.А. Ярмоленко, Д.Л. Горбачев, А.В. Рогачев, А.С. Руденков, А.М. Михалко // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 61–66.
6. Влияние технологических режимов электронного диспергирования политетрафторэтилена на скорость роста покрытий из газовой фазы / А.В. Рогачев, А.И. Егоров, В.П. Казаченко,

С.С. Сидорский // Материалы, технология, инструмент. – 2000. – № 2 (5). – С. 77–80.

7. Мадорский, С. Термическое разложение органических полимеров / С. Мадорский; пер. с англ. под ред. С.П. Рафикова. – Москва: Мир, 1967. – 328 с.

8. Красовский, А.М. Получение тонких пленок распылением полимеров в вакууме / А.М. Красовский, Е.М. Толстомятов. – Минск: Наука и техника, 1989. – 181 с.

9. Рост полимерных покрытий из активной газовой фазы / А.В. Рогачев, В.П. Казаченко, М.В. Буй, А.И. Егоров // Материалы, технология, инструмент. – 1998. – № 1. – С. 60–64.

10. *An injectable self-healing hydrogel with adhesive and antibacterial properties effectively promotes wound healing* / H. Chen, J. Cheng, L. Ran, K. Yu, B. Lu, G. Lan, F. Dai, F. Lu // Carbohydr. Polym. – 2018. – № 201. – P. 522–531.

11. *Comfort and infection control of Chitosan-impregnated cotton gauze as wound dressing* / J.M. Souza, M. Henriques, P. Teixeira, M.M. Fernandes, R. Figueiro, A. Zille // Fibers Polym. – 2019. – Vol. 20, № 5. – P. 922–932.

12. *Rapid hemostatic and mild polyurethane-urea foam wound dressing for promoting wound healing* / X. Liu, Y. Niu, K.C. Chen, S. Chen // Mater. Sci. Eng. – 2017. – № C 71. – P. 289–297.

13. *Hydroxyethylcellulose-g-poly (Lactic Acid) blended polyurethanes: preparation, characterization and biological studies* / A. Noreen, K.M. Zia, S. Tabasum, W. Aftab, M. Shahid, M. Zuber // Int. J. Biol. Macromol. – 2020. – № 151. – P. 993–1003.

14. Перспективы синтеза функциональных биоматериалов из активной газовой фазы / А.В. Рогачев, М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев, Цзян Сяо Хун // Полимерные материалы и технологии. – 2023. – № 4. – С. 97–104.

15. *Antibacterial hydroxyethyl cellulose composite coatings: Structural and controlled release properties with relevance to energetic systems* / Zhenggang Li, Xiaoxue Tan, M.A. Yarmolenko, A.V. Rogachev, Xiaohong Jiang // FirePhysChem. – 2025. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fpc.2025.02.001>

16. *Formation features, structure and properties of bioactive coatings based on phosphate-calcium layers, deposited by a low energy electron beam* / Jintao Xiao, A.V. Rogachev, V.A. Yarmolenko, A.A. Rogachev, Yiming Liu, Xiaohong Jiang, Dongping Sun, M.A. Yarmolenko // Surface & Coatings Technology. – 2019. – № 359. – P. 6–15.

17. *Study on osteoinductive activity of biotin film by low-energy electron beam deposition* / Tongfei Cheng, Jinxing Cao, Tiantian Wu, Xiaohong Jiang, M.A. Yarmolenko, A.A. Rogachev, A.V. Rogachev // Biomaterials Advances. – 2022. – № 135. – P. 212730. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2022.212730>

18. Перифокальные реакции мягких тканей на введение контаминированных имплантатов с

композиционным антибактериальным покрытием: экспериментальное исследование / О.П. Савчук, Д.В. Тапальский, Д.А. Зиновкин, В.И. Николаев, М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев // Травматология и ортопедия России. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 36–45. – DOI: <https://doi.org/10.17816/2311-2905-2000>.

19. Влияние плазменной обработки покрытий на основе кремнийорганических полимеров, осажденных методом электроннолучевого диспергирования, на их структуру и морфологию / М.А. Ярмоленко, О.А. Саркисов, Лю Имин, А.В. Рогачёв // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 1 (46). – С. 38–43.

20. Формирование на поверхности трековых мембран гидрофобных покрытий методом электронно-лучевого диспергирования поливинилхлорида в вакууме / Л.И. Кравец, М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев, Р.В. Гайнутдинов, В.А. Алтынов, Н.Е. Лизунов // Наноиндустрия. – 2021. – Т. 14, № S6. – С. 44–54. – DOI: [10.22184/1993-8578.2021.14.6s.44.54](https://doi.org/10.22184/1993-8578.2021.14.6s.44.54).

21. Formation of hydrophobic polymer coatings on the tracketched membrane surface / L.I. Kravets, M.A. Yarmolenko, R.V. Gainutdinov, V. Satulu, B. Mitu, G. Dinescu // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1954, № 1. – P. 012022. – DOI: [10.1088/1742-6596/1954/1/012022](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1954/1/012022).

22. Analysis of long-term hydrophobic properties stability of the textured polymer coatings produced via electron-beam deposition of polymers on the track-etched membrane surface / L. Kravets, M. Yarmolenko, A. Rogachev, R. Gainutdinov, M. Kuvaitseva, V. Altynov, N. Lizunov // High Temperature Material Processes: An International

Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2025. – Vol. 29, № 3. – P. 57–81. – DOI: [10.1615/HighTempMatProc.2025057717](https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2025057717).

23. Триботехнические свойства покрытий на основе политетрафторэтилена и полиуретана, осаждаемых из активной газовой фазы / А.В. Рогачев, Цзян Сяо Хун, Луде Лу, М.А. Ярмоленко // Трение и износ. – 2004. – № 2 (25). – С. 197–201.

24. Физико-химические закономерности плазмохимического синтеза, структура и свойства нанокмпозиционных полимерных покрытий / А.В. Рогачев, М.А. Ярмоленко, А.А. Рогачев, О.А. Саркисов // Наноструктурные материалы: технология, свойства, применение: сборник научных статей / Нац. Акад. Наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по материаловедению; редкол.: П.А. Витязь (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Беларуская наука, 2017. – С. 162–171.

Материалы статьи подготовлены при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T25КИ-056 от 06.02.2025 г.)

Поступила в редакцию 19.08.2025.

Информация об авторах

Рогачёв Александр Владимирович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.х.н., профессор
Ярмоленко Максим Анатольевич – д.т.н., профессор
Рогачёв Александр Александрович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.т.н., профессор
Цзян Сяо Хун – доктор наук, профессор