

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 541.64.052;539.23;621.315
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-554-560>

Поступило в редакцию 03.04.2019
Received 03.04.2019

М. А. Ярмоленко¹, А. А. Рогачев¹, академик В. Е. Агабеков²

¹*Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины, Гомель, Республика Беларусь*

²*Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ПОЛИМЕРОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ В ВАКУУМЕ

Аннотация. Определены особенности молекулярной структуры и морфологии покрытий на основе полиэтилена (ПЭ) и поливинилхлорида (ПВХ), осажденных из продуктов двукратного (вторичного) электроннолучевого диспергирования исходных полимеров на кварцевые подложки. Макромолекулы покрытия, полученного двукратным диспергированием ПЭ, содержат почти в 3 раза более высокую концентрацию ненасыщенных связей и короткоцепной разветвленности. Оно формируется высокодисперсными пластинчатыми, «спиралевидными» образованиями. Электронно-лучевое воздействие на ПВХ инициирует процессы его дегидрохлорирования, образование полисопряженной структуры. Покрытие на основе «вторичного» ПВХ содержит преимущественно графитоподобные структуры и полиеновые фрагменты, имеет регулярные поры размером 300–700 нм, обладает высокой стойкостью к истиранию, что определяет его эффективное применение в качестве матрицы подложки (носителя) для антибактериальных слоев.

Ключевые слова: электроннолучевая обработка, покрытие, полиэтилен, поливинилхлорид, молекулярная структура, карбонизация, морфология

Для цитирования: Ярмоленко, М. А. Модифицирование линейных полимеров электронно-лучевым диспергированием в вакууме / М. А. Ярмоленко, А. А. Рогачев, В. Е. Агабеков // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 5. – С. 554–560. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-554-560>

Maksim A. Yarmolenko¹, Aleksandr A. Rogachev¹, Academician Vladimir E. Agabekov²

¹*Francisk Skorina Gomel State University, Gomel, Republic of Belarus*

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

MODIFICATION OF LINEAR POLYMERS BY ELECTRON BEAM DISPERSION UNDER VACUUM

Abstract. The features of the molecular structure and morphology of polyethylene (PE) and polyvinyl chloride (PVC) based coatings, deposited from the products of repeated electron beam dispersion of the original polymer, are determined. Macromolecules coatings obtained by repeated dispersing of PE, contain a high concentration of unsaturated bonds and short-chain branching. The coating is formed by highly dispersed lamellar, “spiral” formations. The effect of the electron beam on PVC initiates the processes of dehydrochlorination, the formation of a polyconjugated structure. Recycled PVC-based coatings contain mainly graphite-like structures and polyene fragments, have regular pores of 300–700 nm in size, high abrasion resistance, which determines their effective use as an antibacterial layers matrix.

Keywords: electron beam treatment, coating, polyethylene, polyvinyl chloride, molecular structure, carbonation, morphology

For citation: Yarmolenko M. A., Rogachev A. A., Agabekov V. E. Modification of linear polymers by electron beam dispersion under vacuum. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 5, pp. 554–560 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-5-554-560>

Введение. При воздействии потока электронов средних энергий на полимеры, в них протекают процессы, приводящие, как правило, к деструкции макромолекул и десорбции образовавшихся молекулярных фрагментов в газовую фазу [1]. При взаимодействии этих летучих продуктов с поверхностью твердого тела на ней формируется адсорбционный слой, в котором при определенных условиях происходит их «вторичная» полимеризация, осаждается полимерное покрытие. Молекулярная структура, морфология покрытия определяются природой, химическим составом исходного полимера, режимами и условиями его диспергирования [1–3].

В связи с тем, что основными процессами при электроннолучевой обработке полимеров являются радикальные или ионные реакции, приводящие к отрыву его боковых звеньев и, в конечном счете, к повышению доли атомов углерода в молекулярных фрагментах, вполне обосновано применение электроннолучевого диспергирования в качестве одного из технологических приемов модифицирования полимера и синтеза материала с повышенной степенью карбонизации [1; 2]. Отметим, что покрытия на основе углерода характеризуются высокими механическими свойствами, износостойкостью и биосовместимостью [4]. При осаждении покрытий электроннолучевым диспергированием различных соединений наиболее эффективными приемами изменения их химического состава и структуры являются дополнительное введение в состав мишени соединений, оказывающих влияние на процессы деструкции, активность летучих продуктов [1], проведение процесса в условиях лазерного ассистирования [5; 6], создание в летучих продуктах диспергирования электрических разрядов [7]. Очевидно, что выбор оптимальных условий протекания каждого из этих приемов для наиболее эффективной карбонизации полимеров при обработке электронами является важной задачей.

Кроме того, углеродсодержащие покрытия проявляют высокую антибактериальную активность [4] и создание в них пористой структуры даст возможность использовать их в качестве слоев с программируемым высвобождением действующего компонента. Создание тонких слоев, обладающих свойствами как углеродных, так и полимерных покрытий, и оценка эффективности использования электроннолучевого диспергирования при их формировании на основе полиэтилена и поливинилхлорида, определение особенностей их молекулярной структуры и свойств осаждаемых покрытий является основной целью данной работы.

Материалы и методы исследования. Покрытия формировали из активной газовой фазы, генерируемой воздействием на материал мишени низкоэнергетического потока электронов с энергией 800–1600 эВ и плотностью 0,01–0,03 А/см² в вакууме по методике, описанной в [1]. Начальное давление остаточных газов в вакуумной камере составляло $\sim 4 \cdot 10^{-3}$ Па.

В качестве материала мишени использовали порошки полиэтилена высокого давления (ПЭ), поливинилхлорида (ПВХ), а также их механические смеси, порошок осажденных на стеклянной подложке продуктов их электронно-лучевого диспергирования («вторичный» ПЭ и ПВХ), порошки ПЭ или ПВХ – органическое соединение (гидрохинон, дифениламин, ципрофлоксацин).

Эффективная толщина всех исследованных формируемых покрытий контролировалась непосредственно в процессе нанесения с помощью кварцевого измерителя (QCM) и составляла 0,5 мкм.

В качестве подложек при нанесении покрытий на основе «вторичных» ПЭ и ПВХ при проведении спектроскопических измерений в ультрафиолетовой и видимой (УФ-Вид) области были использованы кварцевые пластины, для ИК спектроскопических исследований методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) – подложки NaCl и пластины монокристалла кремния (100), для оценки антибактериальной активности, стойкости к изнашиванию – титановые пластины размером 50 × 50 × 0,5 мм.

Термообработку покрытий осуществляли в вакууме (10 Па) и в атмосфере воздуха в интервале температур 120–220 °С в течение 60 и 120 мин, в том числе при стерилизации.

Термогравиметрический анализ проводили с помощью DTG-60 (Shimadzu) в атмосфере азота. Скорость нагрева составляла 10 °С/мин.

Исследование молекулярной структуры покрытий проводили на ИК фурье-спектрофотометре Vertex-70 (Bruker) с использованием стандартной термоячейки на пропускание. Анализ порошков производили с помощью метода многократного нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО). Сканирование проводили в диапазоне 4000–500 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹. Полосой внутреннего стандарта были приняты валентные колебания C–H связей в CH₂ группах (2920 см⁻¹). Значения оптических плотностей анализируемых полос соотносили с таковой для внутреннего стандарта. О степени окисления тонкого слоя судили по полосе валентных колебаний карбонильных групп C=O (1730 см⁻¹).

УФ-Вид спектроскопические исследования проводили с помощью спектрофотометра Cary-50 (Varian).

Химический состав осажденных слоев определяли методом РФЭС. Измерения проводили на спектрометре PHI Quantera II Scanning XPS Microprobe с использованием источника Al K α моно-

хроматического рентгеновского излучения ($h\nu = 1486,6$ эВ). Обработка результатов анализа осуществлялась с помощью программного комплекса OriginPro.

Антибактериальную активность покрытий изучали в отношении следующих микроорганизмов: *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853 – минимальная ингибирующая концентрация (МИК) ципрофлоксацина 0,5 мкг/мл (паспортное значение); *Escherichia coli* ATCC 25922 – МИК ципрофлоксацина 0,008 мкг/мл (паспортное значение), по методике, приведенной в [8].

Стойкость сформированных покрытий к истиранию оценивали с помощью возвратно-поступательного трибометра. Нагрузка – 60 г, длина истираемого участка – 17 мм. Индентором служил стальной шарик (диаметр 5 мм), на который крепили два слоя бязи. Перед истиранием индентор смачивали в 0,9 %-ном водном растворе NaCl. Подобная схема испытания моделировала случай взаимодействия покрытия с мягкими тканями организма. После истирания образцы фотометрировали с помощью оптического сканера. Площадь изношенных участков оценивалась с помощью программы ImageJ. Количество полных циклов истирания (17 и 25) выбиралось на основании предварительных исследований с учетом особенностей программного комплекса.

Молекулярная структура и морфология карбонизированных покрытий полиэтилена. Анализ молекулярной структуры и морфологии покрытий, сформированных электронно-лучевым способом с использованием в качестве материала мишени исходного ПЭ и вторичного ПЭ₂, показал, что слои из ПЭ₂ характеризуются более высоким содержанием двойных ненасыщенных связей и короткоцепной разветвленности (табл. 1). Следует отметить, что степень упорядоченности осаждаемых слоев, оцениваемой по отношению оптических плотностей D_{1471}/D_{1465} , как из ПЭ (0,62), так и из ПЭ₂ (0,63) практически одинакова (табл. 1). При этом отношение плотности концевых и внутримолекулярных двойных связей (отношение D_{908}/D_{966}) в 2–3 раза ниже в покрытиях, полученных двукратным диспергированием.

Т а б л и ц а 1. Относительные оптические плотности полос поглощения ИК-спектров покрытий на основе ПЭ и ПЭ₂, сформированных электроннолучевым диспергированием

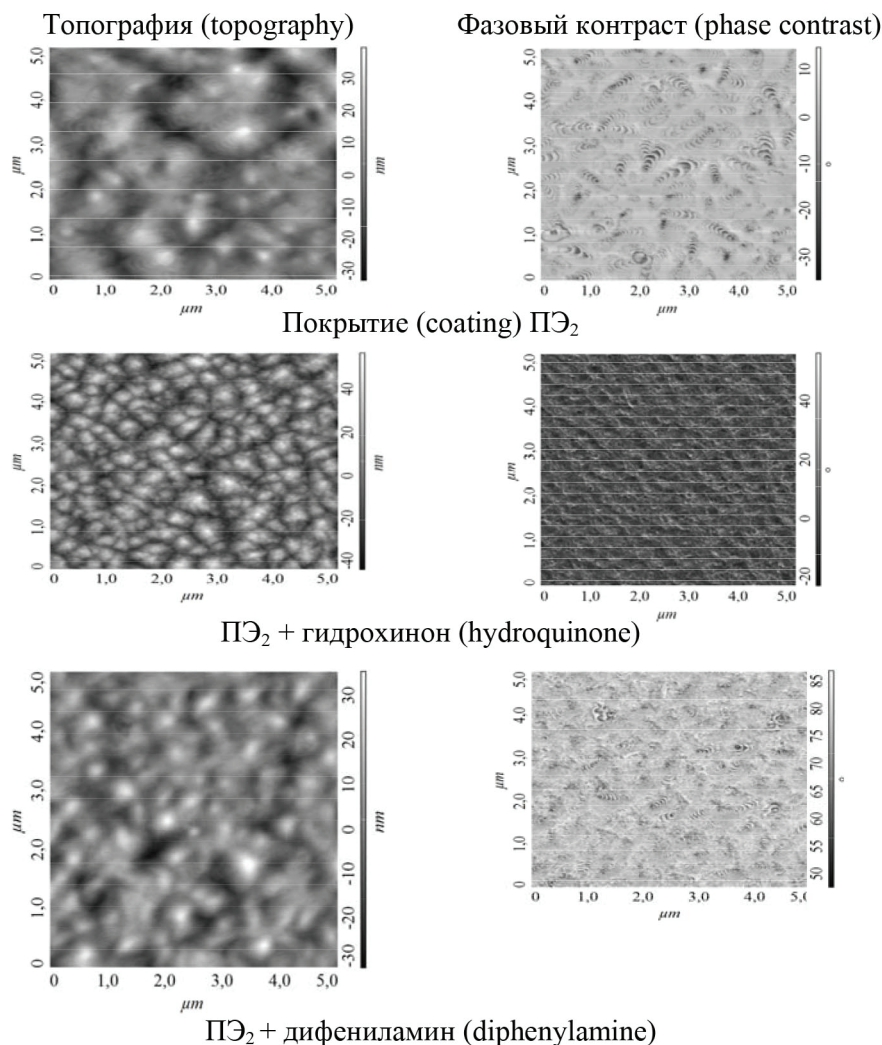
Table 1. Relative optical densities of the absorption bands of the IR spectra of coatings based on PE and PE₂, formed by electron beam dispersion

Покрытие Coating	D_{1378}/D_{1465} $\nu(\text{CH}_2)$	D_{965}/D_{1465} –CH=CH–	D_{908}/D_{1465} –CH=CH ₂	D_{889}/D_{1465} >C=CH ₂	D_{908}/D_{966}	D_{1471}/D_{1465}
ПЭ	0,220	0,078	0,166	0,035	2,13	0,62
ПЭ + гидрохинон	0,176	0,062	0,159	0,033	2,56	0,69
ПЭ + дифениламин	0,249	0,104	0,139	0,032	1,34	0,75
ПЭ ₂	0,316	0,271	0,274	0,095	1	0,63
ПЭ ₂ + гидрохинон	0,292	0,292	0,194	0,106	0,66	0,70
ПЭ ₂ + дифениламин	0,258	0,354	0,260	0,126	0,74	0,75

Следует отметить, что независимо от состава полимера мишени (исходный порошок ПЭ или ПЭ₂) характер влияния гидрохинона и дифениламина на молекулярную структуру формируемого покрытия одинаков (табл. 1). При этом изменения в его структуре являются, в основном, следствием взаимодействия низкомолекулярных соединений с продуктами диспергирования полимера непосредственно в мишени. В случае относительно небольшой молекулярной массы углеводородных фрагментов прослеживается зависимость между степенью упорядоченности тонкого слоя и содержанием в его структуре короткоцепочечной разветвленности (табл. 1).

В морфологии покрытий, осажденных из ПЭ₂, отсутствуют выраженные сфероподобные поверхностные образования, характерные для исходного порошка ПЭ (рис. 1). На изображениях фазового контраста покрытия, полученные при диспергировании смеси ПЭ₂ + гидрохинон, имеют более дисперсную структуру, фиксируется большое количество пластинчатых, «спиралевидных» структур, присутствие которых указывает на участие в их образовании, помимо низкомолекулярных углеводородных фрагментов, и более высокомолекулярных, способных образовывать складчатые образования (рис. 1).

Молекулярная структура и морфология покрытий на основе поливинилхлорида. Термогравиметрическая кривая порошка ПВХ характеризуется наличием двух периодов интенсивной

Рис. 1. АСМ-изображения покрытий, сформированных из ПЭ₂Fig. 1. AFM images of coatings formed from PE₂

потери массы вблизи 300 и 450 °С, а для порошка продуктов электронно-лучевого разрушения ПВХ такие участки отсутствуют: нагрев сопровождается постепенным изменением массы образца. На кривой дифференциально-термического анализа продуктов электронно-лучевой обработки ПВХ выраженные эндотермические пики отсутствуют, в то же время для порошка ПВХ характерно наличие экзотермических полос в интервале 310–365 °С, которые являются следствием химического взаимодействия ненасыщенных связей с образованием сшитой структуры. Для ПВХ подобные реакции возможны только после процесса дегидрохлорирования. Таким образом, на основании результатов калориметрических исследований можно заключить, что химический и фазовый состав осажденных продуктов диспергирования ПВХ является однородным, их молекулярная масса меньше молекулярной массы исходного полимера. Реакции дегидрохлорирования являются конечной стадией диспергирования исходного полимера, а термическая обработка образующихся продуктов инициирует экзотермические процессы их сшивки.

ИК спектр порошка «вторичного» ПВХ и покрытия, сформированного на его основе электронно-лучевым воздействием, содержит полосы поглощения вблизи 18500 и 15500 см⁻¹, соотносимые для ненасыщенных *cis*-(CH)_x и *trans*-(CH)_x соответственно [9]. Для ИК спектра порошка сконденсированных продуктов электронно-лучевой деструкции ПВХ характерно наличие высокоинтенсивного поглощения при 700 и 740 см⁻¹. Известно [10], что одновременное присутствие отмеченных полос поглощения в ИК спектре в ряде случаев является индикатором наличия

в молекулярной структуре органического соединения ароматических фрагментов и обусловлено внеплоскостными деформационными колебаниями С–Н связей для монозамещенных соединений бензола.

Качественным отличием ИК спектров для покрытия и порошка из сконденсированных продуктов электронно-лучевой деструкции ПВХ является прогнозируемое отсутствие полос поглощения С–Сl связей.

Термическая обработка слоя толщиной 0,4–0,8 мкм, согласно результатам ИК спектроскопии, инициирует реакции взаимодействия двойных ненасыщенных связей друг с другом и кислородом воздуха. Следствием подобных взаимодействий при температурах до 200 °С является уменьшение общего уровня ненасыщенности и появление карбонильных групп.

В электронном спектре покрытия присутствует выраженная полоса поглощения при 267 нм, которая свидетельствует о наличии в покрытии 3–4 полиеновых фрагментов с длиной, равной 3–4 звеньям [11]. После термообработки покрытий эта полоса смещается к 282 нм, а также проявляется поглощение при 345 нм, что свидетельствует о формировании протяженных звеньев с длиной до 8 полиеновых фрагментов.

Химический состав сформированных их ПВХ тонких слоев определяли методом РФЭС на основании анализа С1s полосы с максимумом 283,5 эВ. Результаты ее разложения на полосы при 282,6 эВ (С–Si связи) [12], 283,5 эВ (sp гибридное состояние атомов углерода), 284,3 эВ (sp^2 гибридизация) и при 285,1 эВ (sp^3 гибридизация и С–Н-связи) [13] представлены в табл. 2. Сформированные покрытия содержат в основном полисопряженные структуры. На это указывает наиболее высокое содержание атомов углерода в sp гибридном состоянии. Обработка покрытия при 220 °С уменьшает долю sp гибридных атомов углерода и увеличивает долю атомов углерода в sp^2 гибридном состоянии. Таким образом, термически инициируемые реакции взаимодействия двойных связей друг с другом сопровождаются образованием графитовых структур. При этом по данным РФЭС анализа молекулярной структуры сформированных покрытий С–Сl связи отсутствуют.

Т а б л и ц а 2. Фазовый и химический состав покрытия ПВХ₂

Table 2. Phase and chemical composition of PVC₂ coating

Покрытие Coating	Содержание sp^3 атомов углерода, % Content sp^3 carbon atoms, %	Содержание sp^2 атомов углерода, % Content sp^2 carbon atoms, %	Содержание sp атомов углерода, % Content sp carbon atoms, %	Содержание связей С–Si C–Si bond content
ПВХ ₂	2,55	10,62	81,85	4,99
ПВХ ₂ после вакуумного отжига при 220 °С	2,98	12,18	69,31	15,54

В результате протекающих при вторичном диспергировании ПВХ₂ формируются покрытия с развитой морфологией, характеризующей их высокую иммобилизационную активность (рис. 2).

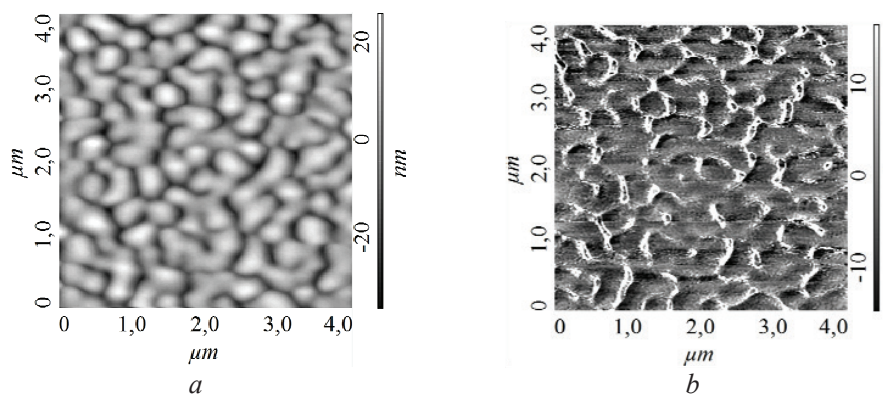


Рис. 2. АСМ изображение покрытия ПВХ₂: *a* – режим топографии; *b* – фазовый контраст

Fig. 2. AFM image of PVC₂ coating: *a* – topography mode; *b* – phase contrast

Покрытие содержит регулярные поры размером 300–700 нм, которые соответствуют таковым для структурных образований биологически активных препаратов, и при этом обладает высокой механической прочностью.

Покрытия на основе «вторичного» ПВХ проявляют повышенную стойкость к истиранию в сравнении с тонким слоем на основе полиуретана (ПУ). Так, после 17 и 25 циклов истирания тонкий слой на основе «вторичного» ПВХ не разрушался. При таких же режимах трения покрытие из ПУ, часто используемое в качестве матрицы антибактериальных слоев, имело площадь изношенных участков (без покрытия) 8,5 и 21 % от всей площади дорожки трения. Композиционный же слой ПУ – ципрофлоксацин в течение 17 циклов трения полностью изнашивался. Площадь изношенных участков при истирании покрытия на основе «вторичного» ПВХ и ципрофлоксацина после 17 циклов истирания составляла 47 %. Использование в качестве матрицы на основе «вторичного» ПВХ позволяет существенно повысить стойкость антибактериального слоя к изнашиванию.

Установлено, что матрица на основе «вторичного» ПВХ в отличие от таковой из ПУ способствует непрерывному и относительно равномерному уменьшению концентрации ципрофлоксацина.

Заключение. Покрытие, полученное двукратным диспергированием ПЭ, формируется высокодисперсными пластинчатыми, «спиралевидными» образованиями, содержит высокую концентрацию ненасыщенных связей и короткоцепную разветвленность.

Термическая обработка покрытия на основе «вторичного» ПВХ инициирует протекание экзотермических процессов взаимодействия ненасыщенных связей, следствием которых является формирование карбино- и графитоподобных структур и полиеновых фрагментов с длиной 8 единиц.

Покрытия на основе вторичного ПВХ содержат регулярные поры размером 300–700 нм, обладают высокой стойкостью к истиранию, что определяет их эффективное применение в качестве матрицы антибактериальных слоев.

Список использованных источников

1. Микро- и нанокпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые из активной газовой фазы / М. А. Ярмоленко [и др.]. – М., 2016. – 424 с.
2. Влияние межмолекулярного взаимодействия на формирование конденсированных слоев из газовой фазы органических соединений / В. Е. Агабеков [и др.] // Хим. журн. Армении. – 2010. – Т. 63, № 1. – С. 19–26.
3. Рогачев, А. А. Физико-химия полимерных покрытий, осажженных из активной газовой фазы / А. А. Рогачев. – М., 2014. – 287 с.
4. Highly wear-resistant and biocompatible carbon nanocomposite coatings for dental implants / O. V. Penkov [et al.] // *Biomaterials*. – 2016. – Vol. 102. – P. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2016.06.029>
5. Abutment Coating With Diamond-Like Carbon Films to Reduce Implant-Abutment Bacterial Leakage / M. Cardoso [et al.] // *J. Periodontol.* – 2016. – Vol. 87, N 2. – P. 168–174. <https://doi.org/10.1902/jop.2015.150362>
6. A preparation of polyethylene coatings by Pulse laser-assisted electron beam deposition / Zhubo Liu [et al.] // *Progress in Organic Coatings*. – 2011. – Vol. 72, N 3. – P. 321–324. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.05.003>
7. Рогачев, А. А. Особенности молекулярной структуры полиэтиленовых покрытий, сформированных из активной газовой фазы / А. А. Рогачев, В. Е. Агабеков // *Свиридовские чтения*. – Минск, 2012. – Вып. 8. – С. 209–216.
8. Биосовместимые полимерные антибактериальные покрытия с пролонгированным высвобождением ципрофлоксацина / М. А. Ярмоленко [и др.] // *Антибиотики и химиотерапия*. – 2007. – Т. 52, № 11–12. – С. 3–7.
9. Optical constants of polyacetylene / H. Fujimoto [et al.] // *Synthetic Metals*. – 1985. – Vol. 10, N 6. – P. 367–375. [https://doi.org/10.1016/0379-6779\(85\)90196-1](https://doi.org/10.1016/0379-6779(85)90196-1)
10. Bellamy, L. J. The Infra-red Spectra of Complex Molecules. *Molecular spectra* / L. J. Bellamy. – Methuen, London, 1954. – P. 323.
11. Minsker, K. S. On Attributing Maximums in Electron Adsorption Spectra of Dehydrochlorinated Polyvinylchloride and the Calculation of Polyene Sequence Distribution / K. S. Minsker, E. O. Krats // *VMS*. – 1971. – Vol. 13, N 5. – P. 1205–1207.
12. Graphitic carbon growth on Si(111) using solid source molecular beam epitaxy / J. Hackley [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 95, N 13. – P. 133114. <https://doi.org/10.1063/1.3242029>
13. Rybachuk, M. Electronic states of trans-polyacetylene, poly(p-phenylenevinylene) and sp-hybridised carbon species in amorphous hydrogenated carbon probed by resonant Raman scattering / M. Rybachuk, J. M. Bell // *Carbon*. – 2009. – Vol. 47, N 10. – P. 2481–2490. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.04.049>

References

1. Yarmolenko M. A., Rogachev A. A., Luchnikov P. A., Rogachev A. V., Dzhang Syan Hun. *Micro- and nanocomposite polymer coatings deposited from the active gas phase*. Moscow, 2016. 424 p. (in Russian).

2. Agabekov V. E., Rogachov A. A., Rogachov A. V., Jarmolenko M. A. The effect of intermolecular interaction on condensed layers formation from the gas phase of organic compounds. *Chemical Journal of Armenia*, 2010, vol. 63, no. 1, pp. 19–26 (in Russian).

3. Rogachev A. A. *Physic-chemistry of polymer coatings deposited from the active gas phase*. Moscow, 2014. 287 p. (in Russian).

4. Penkov O. V., Pukha V. E., Starikova S. L., Khadem M., Starikov V. V., Maleev M. V., Kim D.-E. Highly wear-resistant and biocompatible carbon nanocomposite coatings for dental implants. *Biomaterials*, 2016, vol. 102, pp. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2016.06.029>

5. Cardoso M., Sangalli J., Koga-Ito C. Y., Ferreira L. L., da Silva Sobrinho A. S., Nogueira L. Jr. Abutment Coating With Diamond-Like Carbon Films to Reduce Implant-Abutment Bacterial Leakage. *Journal of Periodontology*, 2016, vol. 87, no. 2, pp. 168–174. <https://doi.org/10.1902/jop.2015.150362>

6. Zhuho Liu, Rogachev A. V., Bing Zhou, Yarmolenko M. A., Rogachev A. A., Gorbachev D. L., Jiang Xiao Hong. A preparation of polyethylene coatings by Pulse laser-assisted electron beam deposition. *Progress in Organic Coatings*, 2011, vol. 72, no. 3, pp. 321–324. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.05.003>

7. Rogachev A. A., Agabekov V. E. Features of the molecular structure of polyethylene coatings formed from the active gas phase. *Sviridovskie chteniya = Sviridov readings*. Minsk, 2012, vol. 8, pp. 209–216 (in Russian).

8. Yarmolenko M. A., Tapal'skij D. V., Rogachev A. V., Rogachev A. A., Kozlova A. I. Biocompatible polymer antibacterial coatings with prolonged release of ciprofloxacin. *Antibiotiki i himioterapiya = Antibiotics and Chemotherapy*, 2007, vol. 52, no. 11–12, pp. 3–7 (in Russian).

9. Fujimoto H., Kamiya K., Tanaka J., Tanaka M. Optical constants of polyacetylene. *Synthetic Metals*, 1985, vol. 10, no. 6, pp. 367–375. [https://doi.org/10.1016/0379-6779\(85\)90196-1](https://doi.org/10.1016/0379-6779(85)90196-1)

10. Bellamy L. J. *The Infra-red Spectra of Complex Molecules. Molecular spectra*. Methuen, London, 1954, pp. 323.

11. Minsker K. S., Krats E. O. On Attributing Maximums in Electron Adsorption Spectra of Dehydrochlorinated Polyvinylchloride and the Calculation of Polyene Sequence Distribution. *VMS*, 1971, vol. 13, no. 5, pp. 1205–1207.

12. Hackley J., Ali D., Di Pasqual J., Demaree J. D., Richardson C. J. K. Graphitic carbon growth on Si(111) using solid source molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 95, no. 13, pp. 133114. <https://doi.org/10.1063/1.3242029>

13. Rybachuk M., Bell J. M. Electronic states of trans-polyacetylene, poly(p-phenylenevinylene) and sp-hybridised carbon species in amorphous hydrogenated carbon probed by resonant Raman scattering. *Carbon*, 2009, vol. 47, no. 10, pp. 2481–2490. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.04.049>

Информация об авторах

Ярмоленко Максим Анатольевич – канд. техн. наук, доцент. Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (ул. Советская, 102, 246003, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: simmak79@mail.ru.

Рогачев Александр Александрович – д-р техн. наук, доцент. Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины (ул. Советская, 102, 246003, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: rogachev78@mail.ru.

Агабеков Владимир Енокович – академик, д-р хим. наук, профессор, директор. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: agabekov@ichnm.basnet.by.

Information about the authors

Yarmolenko Maksim Anatolievich – Ph. D. (Engineering), Associate professor. Francisk Skorina Gomel State University (102, Sovetskaya Str., 246003, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: simmak79@mail.ru.

Rogachev Aleksandr Aleksandrovich – D. Sc. (Engineering), Associate professor. Francisk Skorina Gomel State University (102, Sovetskaya Str., 246003, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: rogachev78@mail.ru.

Agabekov Vladimir Enokovich – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director. Institute of New Materials Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: agabekov@ichnm.basnet.by.