

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-359-366>

УДК 539.23

## Структура и свойства многослойных нанокomпозиционных покрытий поливинилового спирта с наночастицами оксида алюминия

Магистры Д. В. Сапсалёв<sup>1,2)</sup>, А. С. Петровская<sup>1)</sup>, Д. Л. Радюкевич<sup>1)</sup>,  
Т. Н. Толстая<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. Г. Б. Мельникова<sup>1)</sup>,  
академик НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. С. А. Чижик<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка  
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023  
Belarusian National Technical University, 2023

**Реферат.** Создание нанокomпозиционных полимер-неорганических материалов, изучение их морфологии и механических свойств на наноуровне актуальны в области разработки новых материалов различного функционального назначения, в том числе медицинского. В результате проведенных исследований разработана методика получения одно- и многослойных пленок поливинилового спирта и композиционных полимерных покрытий с наночастицами оксида алюминия методом спин-коатинга. Показано, что оптимальное массовое содержание наночастиц оксида алюминия в суспензии для получения однородных композиционных покрытий составляет 0,625 %. На основании данных о структурно-морфологических и механических свойствах сформированных покрытий, полученных методом атомно-силовой микроскопии, установлено, что увеличение количества слоев композиционных покрытий приводит к росту числа конгломератов, что, в свою очередь, повышает шероховатость поверхности пленок. Модуль упругости однослойных пленок поливинилового спирта составляет  $(509,5 \pm 10 \%)$  МПа. В случае пленок композиционных покрытий с наночастицами оксида алюминия изменения модуля упругости установлены для многослойных покрытий: увеличение до 559,0 МПа (5 слоев) и уменьшение до 415,2 МПа (10 слоев). Модуль упругости исследуемых однослойных покрытий значительно снижается в диапазоне 20–40 °С. Наименьшие значения после воздействия температур определены для пленок с наночастицами  $(236,2 \pm 10 \%)$  МПа. Нанокomпозиты демонстрируют рост краевого угла смачивания с увеличением количества слоев композиционных покрытий до 20. Последующий рост толщины покрытий (количества слоев) приводит к увеличению гидрофильности нанокomпозитов. Разработанные составы нанокomпозиционных пленок перспективны в качестве сорбционных покрытий.

**Ключевые слова:** композиционные полимерные покрытия, поливиниловый спирт, неорганические наночастицы, оксид алюминия, спин-коатинг, атомно-силовая микроскопия

**Для цитирования:** Структура и свойства многослойных нанокomпозиционных покрытий поливинилового спирта с наночастицами оксида алюминия / Д. В. Сапсалёв [и др.] // *Наука и техника*. 2023. Т. 22, № 5. С. 359–366. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-359-366>

### Адрес для переписки

Сапсалёв Дмитрий Владимирович  
Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова  
НАН Беларуси  
ул. П. Бровки, 15,  
220072, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: 375 17 235-11-32  
dsapsalev@list.ru

### Address for correspondence

Sapsaliou Dmitry V.  
A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute  
of the National Academy of Science of Belarus  
15, P. Brovka str.,  
220072, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 235-11-32  
dsapsalev@list.ru

## Structure and Properties of Multilayer Nanocomposite Coatings of Polyvinyl Alcohol with Aluminum Oxide Nanoparticles

D. V. Sapsaliou<sup>1,2)</sup>, A. S. Petrovskaya<sup>1)</sup>, D. L. Radyukevich<sup>1)</sup>, T. N. Tolstaya<sup>1)</sup>, G. B. Melnikova<sup>1)</sup>, S. A. Chizhik<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The nanocomposite polymer – inorganic materials formation, the study of their morphology and mechanical properties at the nanolevel is acute in the development of new materials for various functional purposes, including medical ones. As a result of the research the technique for producing single- and multilayer films of polyvinyl alcohol and composite polymer coatings with aluminum oxide nanoparticles by the spin coating method has been developed. It is shown that the optimal mass content of aluminum oxide nanoparticles in suspension for the formation of uniform composite coatings is 0.625 %. Based on experimental data on the structural-morphological and mechanical properties of the formed coatings obtained by atomic force microscopy, it has been found that an increase in the number of layers of composite coatings leads to an increase in the number of conglomerates which, in turn, increases the surface roughness of the films. The modulus of elasticity of single-layer films of polyvinyl alcohol is  $(509.5 \pm 10 \%)$  MPa. In the case of composite coatings with aluminum oxide nanoparticles, changes in the elastic modulus have been established for multilayer coatings: an increase to 559.0 MPa (5 layers) and a decrease to 415.2 MPa (10 layers). The modulus of elasticity of the investigated single-layer coatings is significantly reduced in the range of 20–40 °C. The smallest values after exposure to temperatures have been determined for films with nanoparticles  $(236.2 \pm 10 \%)$  MPa. Nanocomposites demonstrate an increase in the contact angle with an increase in the number of layers of composite coatings up to 20. A subsequent increase in the thickness of the coatings (the number of layers) leads to an increase in the hydrophilicity of the nanocomposites. The developed compositions of nanocomposite films are promising as sorption coatings.

**Keywords:** composite polymer coatings, polyvinyl alcohol, inorganic nanoparticles, aluminum oxide, spin coating, atomic force microscopy

**For citation:** Sapsaliou D. V., Petrovskaya A. S., Radyukevich D. L., Tolstaya T. N., Melnikova G. B., Chizhik S. A. (2023) Structure and Properties of Multilayer Nanocomposite Coatings of Polyvinyl Alcohol with Aluminum Oxide Nanoparticles. *Science and Technique*. 22 (5), 359–366. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-359-366> (in Russian)

### Введение

Доминирующая тенденция в разработке современных раневых повязок – использование полимерных композитов. Основными требованиями, предъявляемыми к покрытиям, являются антиаллергенность, биосовместимость и биодеградируемость. Кроме того, полимер не должен оказывать токсического воздействия [1]. Для эффективного лечения ран и раневой инфекции требуются перевязочные средства с высокой сорбционной активностью, способные эффективно удалять избыток раневого экссудата. Раневые покрытия также должны обладать проницаемостью для паров воды, но исключать высушивание раневой поверхности; предотвращать вторичное инфицирование раны; иметь высокую механическую прочность [2].

Применение раневых повязок на основе материалов природного происхождения, обладающих необходимыми биологическими свой-

ствами и влияющих на функции клеток, ограничено высокой скоростью деградации материалов, в то время как использование синтетических полимеров, таких как поливиниловый спирт (ПВС), полиакриловая и полиметакриловая кислоты и другие [3, 4], обеспечивает механическую прочность, но недостаточные биоактивные свойства [5, 6]. К преимуществам применения таких полимерных пленок относятся более высокая степень защиты по сравнению с тканевыми материалами, а также их полная атравматичность. Наибольший интерес для изготовления водорастворимых пленочных материалов представляет ПВС. Данный полимерный материал является достаточно доступным, дешевым и разрешенным для применения в пищевой промышленности и медицине. ПВС устойчив по отношению к большинству органических растворителей, масел и жиров, а также обладает высокой сорбционной активностью [7].

Модификация полимеров с использованием неорганических наночастиц позволяет форми-

ровать биоматериалы с улучшенными механическими и антибактериальными свойствами. Наночастицы оксида алюминия широко применяются в биомедицине благодаря их исключительным физико-химическим и структурным характеристикам (устойчивость к износу, химическим веществам, механическим воздействиям; пористая поверхность). Кроме того, биоинертность и функциональность поверхности позволяют использовать наночастицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в биологических средах. Высокая активность  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при взаимодействии с полярными веществами позволяет использовать его в качестве сорбирующего компонента в пленке [8, 9].

Таким образом, варьируя соотношение компонентов и условия формирования, можно получать композиционные полимерные покрытия различного состава, структуры и морфологии [10]. В связи с этим существенный интерес представляет исследование структуры и физико-механических свойств композиционных полимерных пленок на наноуровне.

Цель работы – формирование композиционных покрытий на основе поливинилового спирта и наночастиц оксида алюминия методом спин-коатинга, изучение их структурно-механических характеристик.

### Материалы и методы исследования

Пленки ПВС формировали на кремниевых пластинах методом спин-коатинга из водного раствора полимера с концентрацией 1 мг/мл, обработанного ультразвуком в течение 5 мин (УЗ; Bandelin electronic, Германия; частота 35 кГц). Пластины монокристаллического кремния (ориентация 111,  $1 \times 1$  см) предварительно гидрофилизировали выдерживанием в течение 15 мин при  $70^\circ\text{C}$  в пероксидно-аммиачной смеси; затем подложки промывали дистиллированной водой и сушили в токе азота [11].

На водную суспензию наночастиц оксида алюминия 20 мас.% (далее – %),  $d = 30\text{--}60$  нм (Sigma-Aldrich, Китай) предварительно воздействовали УЗ. Затем путем последовательного разбавления дистиллированной водой получали суспензии наночастиц с различным массовым содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Рабочие суспензии для формирования композиционных покрытий

готовили добавлением к 1 мл раствора ПВС ( $c = 2$  мг/мл) по 1 мл суспензии нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Полученные суспензии подвергали обработке УЗ в течение 15 мин.

Для формирования пленок методом спин-коатинга на кремниевые пластины, вращающиеся со скоростью 3200 об/мин, прикапывали растворы (суспензии) объемом 8 мкл. При получении многослойных покрытий между нанесением слоев выдерживали 1 мин для испарения остаточных количеств растворителя (вращение не прекращалось).

Морфологию, механические и термомеханические свойства поверхности сформированных пленок исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на приборе NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь). Для исследования термомеханических свойств пленки ПВС и композиционные покрытия с нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$  нагревали до от  $20$  до  $100^\circ\text{C}$  в течение 15 мин на термоплатформе АСМ. Подробное описание методики исследования представлено в работе [11].

Оценку гидрофильных свойств поверхности сформированных покрытий проводили на основании измерений краевых углов смачивания (КУС) на установке DSA 100E (KRUSS, Германия) методом лежащей капли [11].

### Результаты и обсуждение

Методом АСМ установлено, что однослойное покрытие ПВС имеет однородную структуру поверхности (рис. 1а). В случае композиционных покрытий ПВС + нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$  наблюдается рост числа и размеров конгломератов с увеличением содержания наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в суспензии для формирования покрытий. Так, для пленок ПВС + нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $c = 5\%$ ) характерно большое количество скоплений наночастиц, объединенных в «островки» и «цепочки» (рис. 1б). Большое количество конгломератов в структуре нанокompозитов обусловлено наличием гидроксильных групп в макромолекулах ПВС, и, как следствие, высокой степенью взаимодействия полимер–наночастицы (обволакивание наночастиц оксида алюминия). Так, согласно данным АСМ о морфологии поверхности, показано, что уменьшение содержания наночастиц оксида алюминия позволяет сформировать

однородные композиционные покрытия за счет снижения количества скоплений наночастиц, а также их более равномерного распределения в полимере. На поверхности покрытий ПВС + нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $c = 1,25\%$ ) присутствуют как конгломераты, так и отдельные наночастицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 1с). При содержании  $0,625\%$  нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$  в структуре поверхности покрытий наблюдается минимальное количество относительно равномерно распределенных конгломератов по сравнению со всеми исследуемыми концентрациями (рис. 1д). В последующем для получения многослойных композиционных покрытий и изучения их термомеханических свойств использовали суспензии с содержанием  $0,625\%$  нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Для многослойных пленок ПВС установлено, что с увеличением числа слоев до 10 возрастает количество дефектов на поверхности покрытий, что приводит к росту значений шероховатости (табл. 1). Последующее увеличение числа слоев до 20 и 30 сглаживает неровности поверхности и позволяет сформировать покрытия с минимальным количеством дефектов (рис. 2).

Получение многослойных композиционных полимер-неорганических пленок приводит к воз-

растанию значений шероховатости поверхности с увеличением количества слоев (табл. 1) в результате образования большого количества конгломератов (рис. 3).

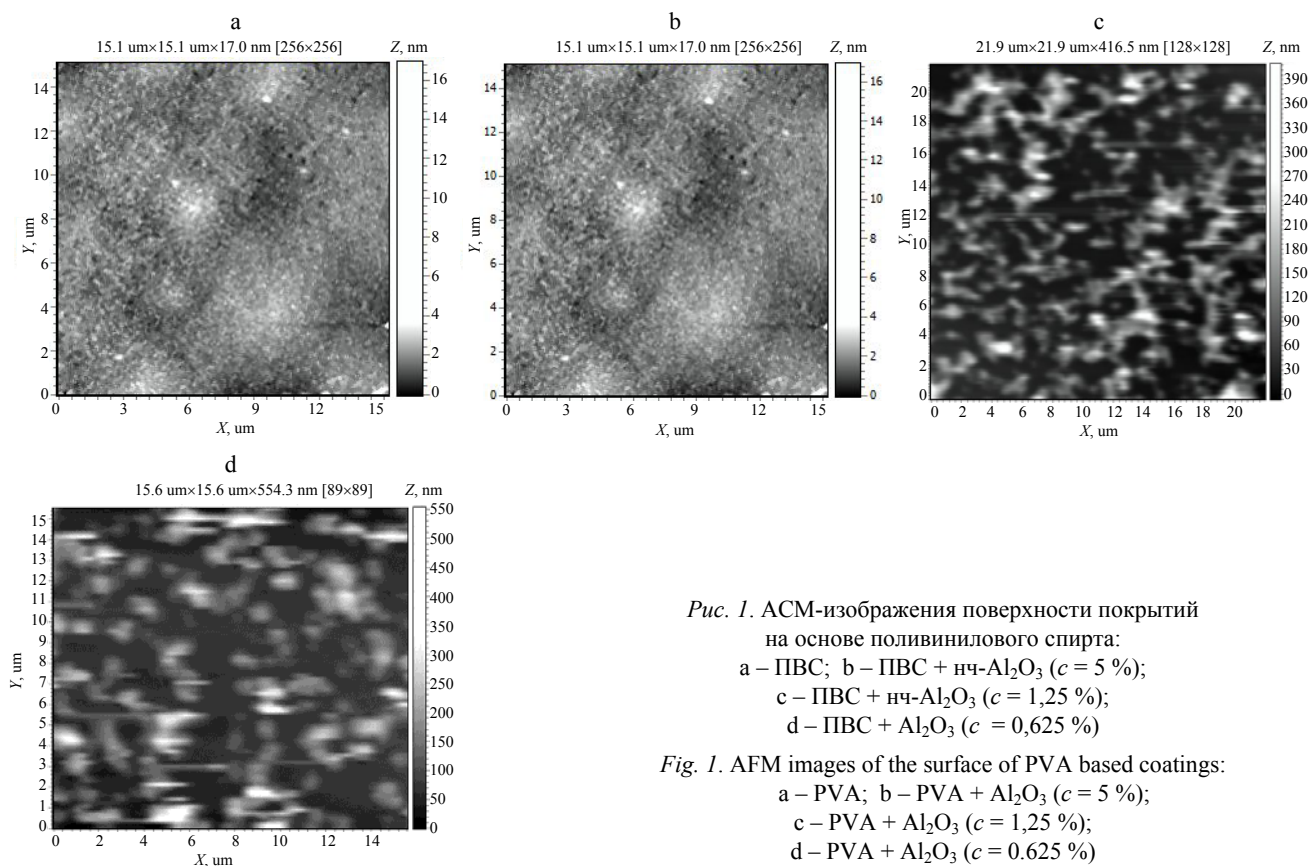
Таблица 1

**Значения шероховатостей поверхности пленок на основе ПВС и нанокomпозиционных покрытий ПВС + нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$**

**Surface roughness values for the PVA based films and nanocomposite coatings PVA +  $\text{Al}_2\text{O}_3$**

Образец	$R_a$ , нм	$R_q$ , нм	Количество слоев	$R_a$ , нм	$R_q$ , нм	Образец
ПВС	1,6	1,9	1	17,9	23,7	ПВС + нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$
	1,5	1,8	5	41,2	50,8	
	1,6	2,2	10	69,8	86,5	
	1,4	1,8	20	83,8	103,9	
	1,1	1,4	30	92	114,1	

Структура покрытий характеризуется плотным скоплением сферообразных конгломератов. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что, помимо обволакивания наночастиц оксида алюминия полимером, происходит также «наслаивание» пленки при нанесении каждого последующего слоя, что и приводит к увеличению размеров конгломератов.



**Рис. 1.** АСМ-изображения поверхности покрытий на основе поливинилового спирта:  
 а – ПВС; б – ПВС + нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $c = 5\%$ );  
 с – ПВС + нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $c = 1,25\%$ );  
 д – ПВС +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $c = 0,625\%$ )

**Fig. 1.** AFM images of the surface of PVA based coatings:  
 а – PVA; б – PVA +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $c = 5\%$ );  
 с – PVA +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $c = 1,25\%$ );  
 д – PVA +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $c = 0,625\%$ )

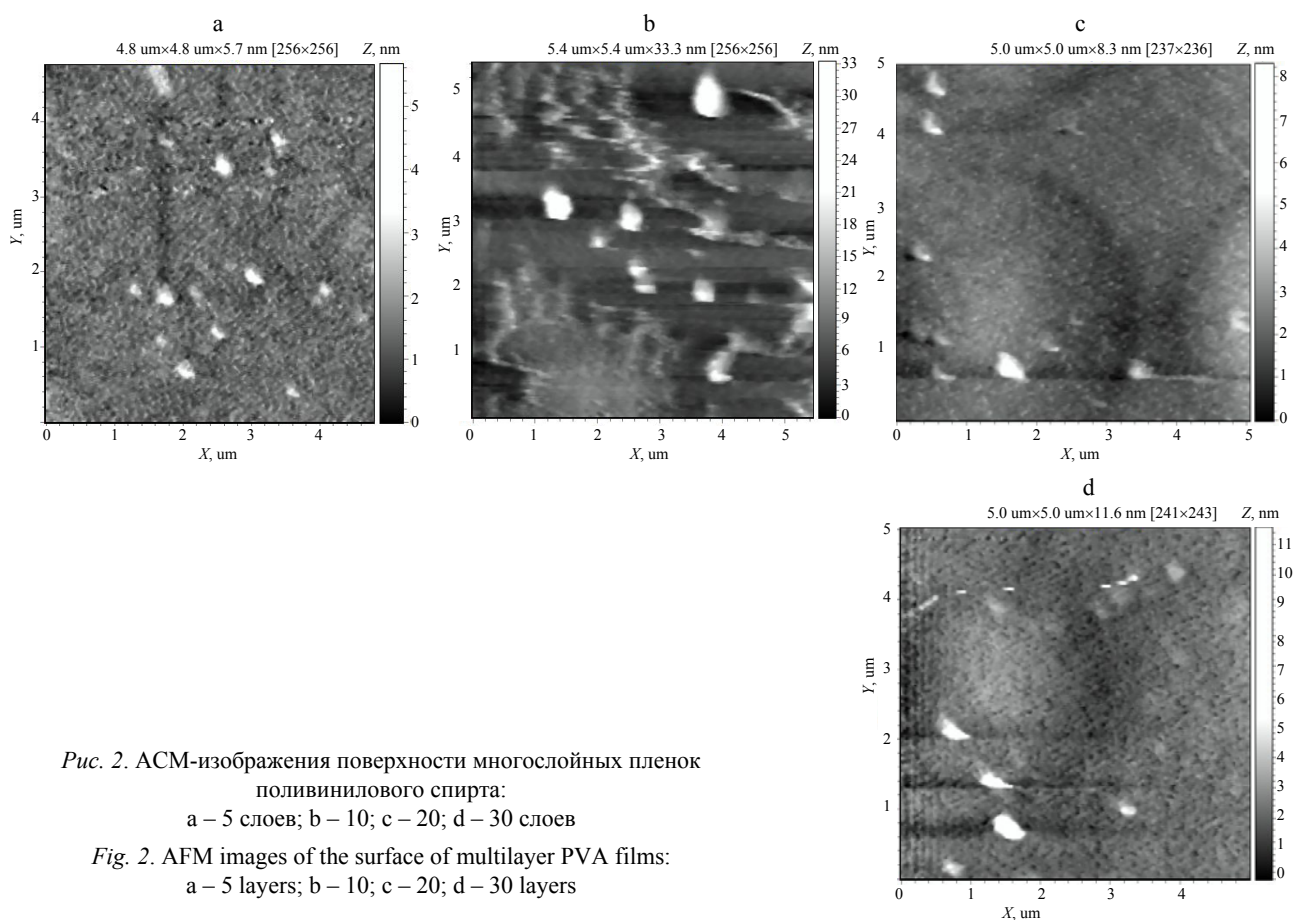


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности многослойных пленок поливинилового спирта:

a – 5 слоев; b – 10; c – 20; d – 30 слоев

Fig. 2. AFM images of the surface of multilayer PVA films:

a – 5 layers; b – 10; c – 20; d – 30 layers

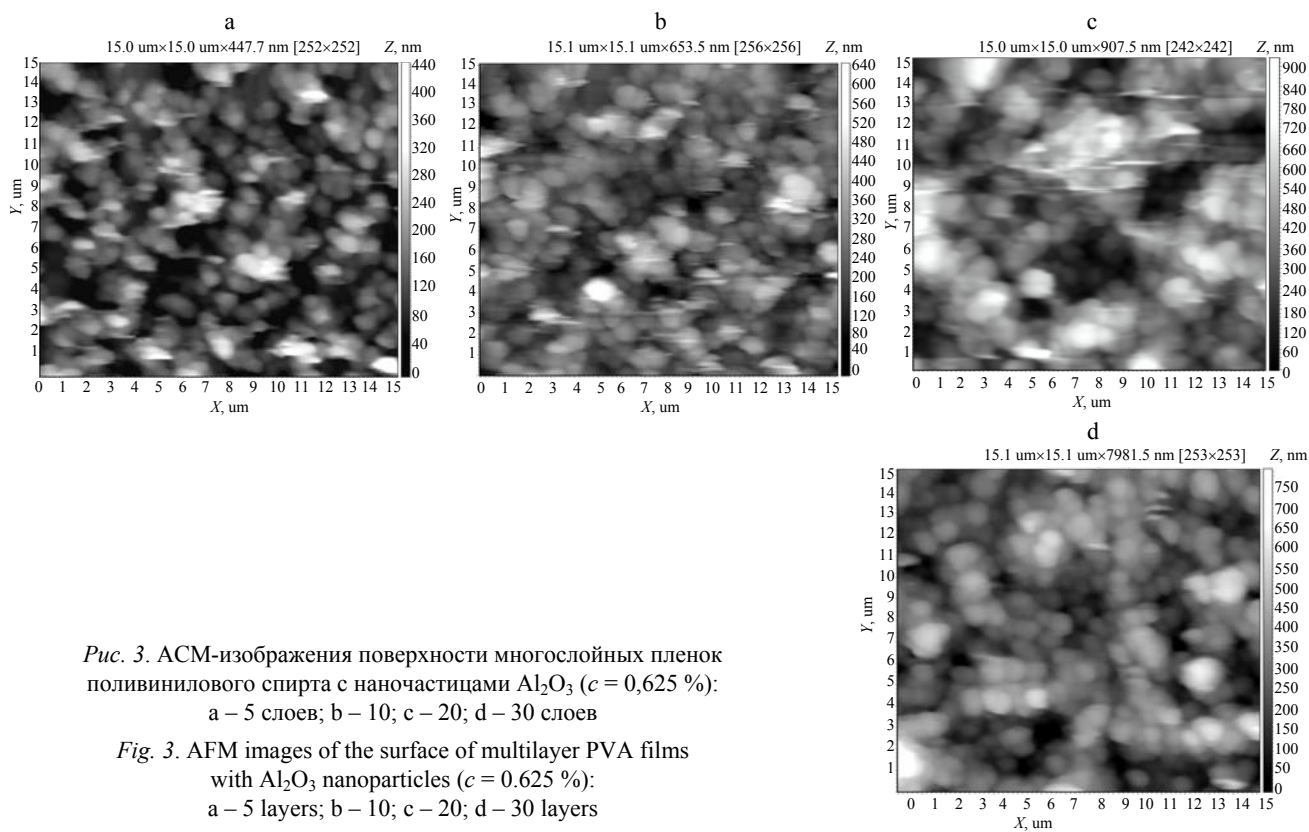


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности многослойных пленок поливинилового спирта с наночастицами  $Al_2O_3$  ( $c = 0,625\%$ ):

a – 5 слоев; b – 10; c – 20; d – 30 слоев

Fig. 3. AFM images of the surface of multilayer PVA films

with  $Al_2O_3$  nanoparticles ( $c = 0.625\%$ ):

a – 5 layers; b – 10; c – 20; d – 30 layers

Результаты исследования механических свойств пленок ПВХ и композиционных покрытий с наночастицами  $Al_2O_3$  методом АСМ представлены на рис. 4. Модуль упругости пленок ПВХ составляет  $(509,5 \pm 10 \%)$  МПа, с увеличением количества слоев значения  $E$  не изменяются в пределах экспериментальной ошибки. Для композиционных пленок ПВХ с наночастицами изменения модуля упругости установлены только для многослойных покрытий: увеличение  $E$  до 559,0 МПа (для 5-слойных) и уменьшение до 415,2 МПа (для 10-слойных). Предполагаем, что в случае 5-слойных пленок формируется плотное нанокomпозиционное покрытие за счет равномерного распределения неорганических наночастиц в полимерной матрице, а также минимизации дефектов благодаря последовательному многослойному их закрытию.

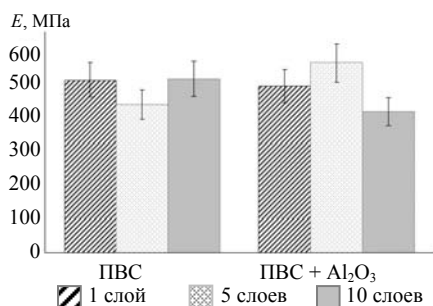


Рис. 4. Значения модуля упругости для пленок на основе поливинилового спирта  
 Fig. 4. Values of the elastic modulus for the PVA based films

На рис. 5 представлена диаграмма значений силы адгезии пленок ПВХ и композиционных покрытий с наночастицами  $Al_2O_3$ .

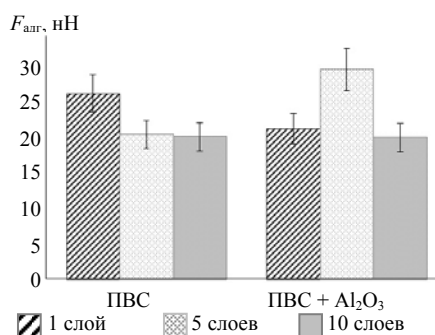


Рис. 5. Значения силы адгезии для пленок на основе поливинилового спирта  
 Fig. 5. Adhesion force values for the PVA based films

Установлено, что введение наночастиц в однослойные полимерные пленки приводит к снижению значений  $F_{адг}$  до 21,0 нН. В случае многослойных пленок (5 слоев) при введе-

нии  $Al_2O_3$  наблюдается увеличение значений силы адгезии. Изменений  $F_{адг}$  при введении наночастиц в полимерные 10-слойные покрытия установлено не было.

Результаты исследования термомеханических свойств композиционных полимерных покрытий представлены на рис. 6. Установлено, что модуль упругости исследуемых пленок после воздействия температур значительно снижается: наибольший перепад величины  $E$  происходит в диапазоне температур 20–40 °С, дальнейшее увеличение температуры значительного влияния на модуль упругости не оказывает: отклонения значений происходят в пределах экспериментальной ошибки.

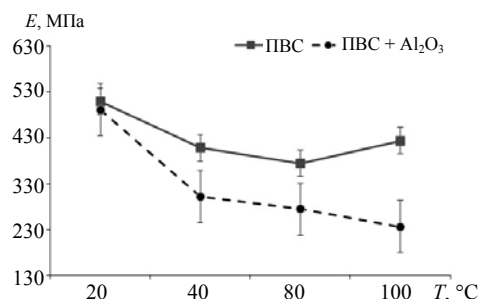


Рис. 6. Термомеханические свойства однослойных полимерных покрытий на основе поливинилового спирта  
 Fig. 6. Thermomechanical properties of single-layer PVA based coatings

Следует отметить, что наименьшие значения  $E$  после воздействия температур зафиксированы у пленок с наночастицами:  $(236,2 \pm 10 \%)$  МПа. Снижение модуля упругости покрытий обусловлено деструктуризацией полимерных монослоев в результате введения неорганических наночастиц.

Исследование гидрофильных свойств поверхности сформированных покрытий показало, что с увеличением количества слоев полимерных покрытий до 20 наблюдается рост значений КУС. Увеличение количества слоев ПВХ до 30 приводит к повышению смачиваемости поверхности – КУС снижается до исходных значений, что обусловлено соответствующим изменением дисперсионной составляющей удельной поверхностной энергии (рис. 7а, д). В случае нанокomпозиционных покрытий установлен пологий характер увеличения значений  $w$  в зависимости от количества полимерных слоев, что обусловлено ростом полярной составляющей удельной поверхностной энергии (рис. 7б, с), основной вклад в которую вносит наличие конгломератов «свободных» наночастиц на поверхности покрытия.

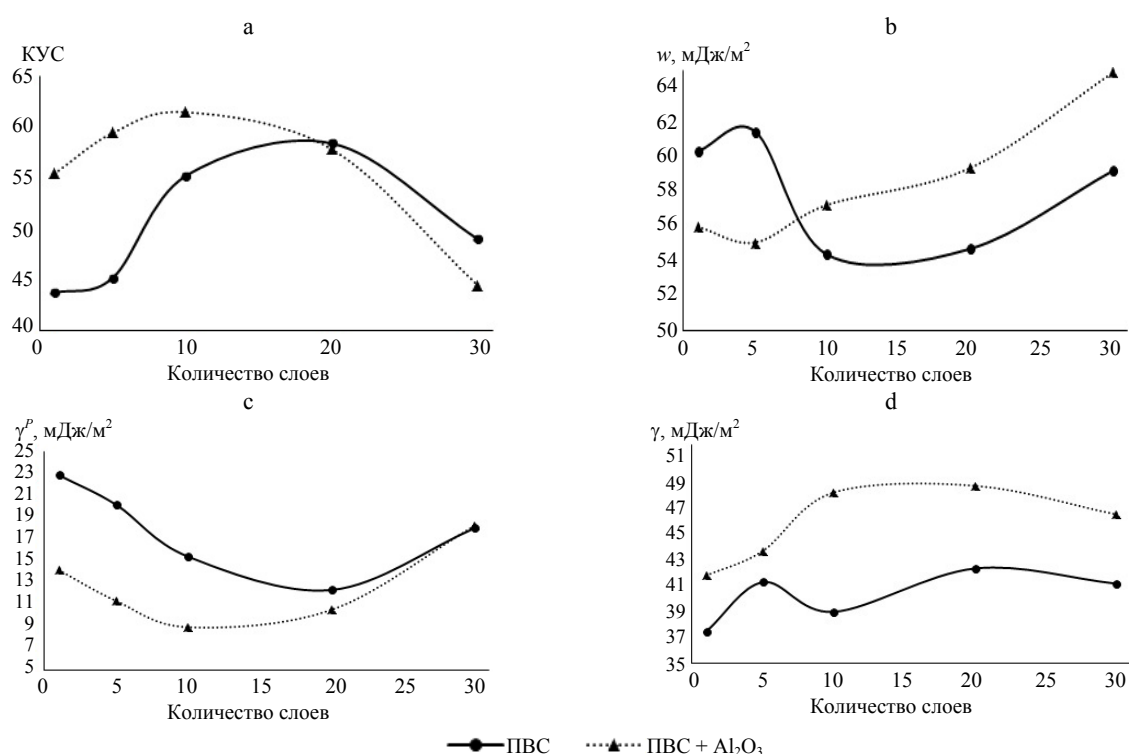


Рис. 7. Зависимости значений краевого угла смачивания (а), удельной поверхностной энергии (б), полярной (с) и дисперсионной (д) составляющих удельной поверхностной энергии от количества слоев полимерных покрытий

Fig. 7. Dependences of the values of the contact angle (a), specific surface energy (b), polar (c) and dispersion (d) components of the specific surface energy on the number of layers of polymer coatings

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика получения нанокомпозиционных пленок ПВХ с наночастицами оксида алюминия методом спин-коатинга. На основании АСМ-данных выбрана оптимальная концентрация нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$  в суспензии для формирования однородных нанокомпозиционных покрытий ( $c = 0,625\%$ ). Методом АСМ установлено, что однослойное покрытие ПВХ имеет однородную структуру. Увеличение количества слоев композиционных пленок приводит к росту числа конгломератов, что, в свою очередь, повышает шероховатость поверхности многослойных пленок. Максимальное значение  $R_q = 114,1$  нм было установлено для многослойной (30 слоев) пленки ПВХ с наночастицами  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

2. На основе данных механических и термомеханических свойств сформированных покрытий показано, что пленки ПВХ и ПВХ + нч- $\text{Al}_2\text{O}_3$  имеют близкие значения  $E$  в пределах доверительного интервала. Нагревание пленок приводит к снижению модуля упругости исследуемых однослойных покрытий.

Наименьшие значения  $E$  после воздействия температур (от 40 до 100 °С) зафиксированы у полимерных пленок с наночастицами ( $E = 236,2$  МПа).

3. На основании полученных данных об увеличении значений шероховатости, смачиваемости поверхности 30-слойные композиционные пленки на основе ПВХ могут быть рекомендованы в качестве перспективных сорбционных покрытий.

Работа выполнена в рамках договора с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований № T21M-051 от 01.07.2021.

## ЛИТЕРАТУРА

- Хлыстова, Т. С. Технология получения лечебных депозитов на текстильной и гидрогелевой основе с использованием печатных композиций из смеси биополимеров – полисахаридов: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.02 / Т. С. Хлыстова. М., 2015. 180 с.
- Макаренко, М. В. Современные подходы к разработке раневых покрытий / М. В. Макаренко, В. П. Курченко, С. А. Усанов // Труды БГУ. Сер. Физиологические,

- биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем. 2016. Т. 11, ч. 1. С. 273–279.
3. Mallakpour, S. Enhancement in Thermal Properties of Poly(Vinyl Alcohol) Nanocomposites Reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles / S. Mallakpour, M. Dinari // *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2012. Vol. 32, No 4. P. 217–224. <https://doi.org/10.1177/0731684412467236>.
  4. Соловьев, В. С. Полимерные водопоглощающие композиции с повышенной прочностью / В. С. Соловьев, М. В. Успенская, Н. В. Сиротинкин // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2010. Т. 53, № 4. С. 63–65.
  5. Современные раневые покрытия в лечении гнойных ран / Ю. С. Винник [и др.] // *Новости хирургии*. 2015. Т. 23, № 5. С. 552–558. <https://doi.org/10.18484/2305-0047.2015.5.552>.
  6. Polyvinyl Alcohol and Pectin Blended Films: Preparation, Characterization and Mesenchymal Stem Cells Attachment / A. Kraskouski [et al.] // *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2021. Vol. 109, Iss. 8. P. 1379–1392. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37130>.
  7. Амерханова, Ш. К. Особенности сорбционных свойств модифицированных полимерных пленок на основе поливинилового спирта / Ш. К. Амерханова, Р. М. Шляпов, А. С. Уали // Сорбционные и хроматографические процессы. 2012. Т. 12, № 6. С. 875–883.
  8. Куделин, Н. Адсорбционная способность наноразмерного оксида алюминия / Н. Куделин, Н. К. Кхань // *Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XI Всероссийской науч.-практ. конф. студ. и аспирантов*. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2010. Т. 1. С. 91–93.
  9. Адсорбционные свойства оксида алюминия, модифицированного наночастицами Со и СоО / С. Н. Ланин [и др.] // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2017. Т. 53, № 3. С. 247–254. <https://doi.org/10.7868/S0044185617030159>.
  10. Абилова, Г. К. Разработка технологии получения гидрогелевых лекарственных форм и повязок: дис. ... д-ра философии: 6D072100 / Г. К. Абилова. Алматы, 2019. 135 с.
  11. Структура и свойства многослойных нанокomпозиционных покрытий хитозана с наночастицами оксида алюминия / Д. В. Сапсалёв [и др.] // *Полимерные материалы и технологии*. 2023. Т. 9, № 1. С. 52–58. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-1-52-58>.
- Поступила 18.04.2023  
Подписана в печать 20.06.2023  
Опубликована онлайн 29.09.2023
- REFERENCES
1. Khlystova T. S. (2015) *Technology for Obtaining Medical Depot Materials on a Textile and Hydrogel Basis Using Printed Compositions From a Mixture of Biopolymers – Polysaccharides*. PhD eng. sci. diss. Moscow. 180 (in Russian).
  2. Makarenko M. V., Kurchenko V. P., Usanov S. A. (2016) Modern Approaches to the Development of Wound Coverings. *Trudy BGU. Seriya: Fiziologicheskie, Biokhimi-cheskie i Molekulyarnye Osnovy Funktsionirovaniya Biosistem = Proceedings of the Belarusian State University. Series of Physiological, Biochemical and Molecular Biology Sciences*, 11 (1), 273–279 (in Russian).
  3. Mallakpour S., Dinari M. (2012) Enhancement in Thermal Properties of Poly (Vinyl Alcohol) Nanocomposites Reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32 (4), 217–224. <https://doi.org/10.1177/0731684412467236>.
  4. Solov'ev V. S., Uspenskaya M. V., Sirotkin N. V. (2010) Polymeric Water-Absorbing Compositions with Increased Strength. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Pribo-rostroenie = Journal of Instrument Engineering*, 53 (4), 63–65 (in Russian).
  5. Vinnik Yu. S., Markelova N. M., Solov'eva N. S., Shishat-skaya E. I., Kuznetsov M. N., Zuev A. P. (2015) Modern Wound Dressings in the Treatment of Purulent Wounds. *Novosti Khirurgii*, 23 (5), 552–558. <https://doi.org/10.18484/2305-0047.2015.5.552> (in Russian).
  6. Kraskouski A., Hileuskaya K., Kulikouskaya V., Kabanava V., Agabekov V., Pinchuk S., Vasilevich I., Volotov-ski I., Kuznetsova T., Lapitskaya V. (2021) Polyvinyl alcohol and Pectin Blended Films: Preparation, Characterization and Mesenchymal Stem Cells Attachment. *Journal of Biomedical Materials Research. Part A*, 109 (8), 1379–1392. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37130>.
  7. Amerkhanova Sh. K., Shlyapov R. M., Uali A. S. (2012) Peculiarities of Sorption Properties of Modified Polymer Films Based on Polyvinyl Alcohol. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protssesy = Sorption and Chromatog-raphy processes*, 12 (6), 875–883 (in Russian).
  8. Kudelin N., Kkhan' N. K. (2010) Adsorption Capacity of Nanosized Aluminum Oxide. *Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya v XXI veke: Materialy XI Vserossiiskoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii Studentov i Aspiran-tov. T. 1* [Chemistry and Chemical Technology in the 21<sup>st</sup> Century: Proceedings of the XI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students and Postgraduates. Vol. 1]. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 91–93 (in Russian).
  9. Lanin S. N., Bannykh A. A., Vlasenko E. V., Vinogradov A. E., Lanina K. S., Levachev S. M. (2017) Adsorption Properties of Aluminum Oxide Modified with Co and CoO Nanoparticles. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 53 (3), 408–415. <https://doi.org/10.1134/s2070205117030145>.
  10. Abilova G. K. *Development of Technology for Obtaining Hydrogel Dosage Forms and Dressings*. PhD. diss. Almaty, 2019, 135 (in Russian).
  11. Sapsaliou D. V., Petrovskaya A. S., Radyukevich D. L., Khabarava A. V., Melnikova G. B., Chizhik S. A. (2023) Structure and Properties of Multilayer Nanocomposite Coatings of Chitosan with Aluminum Oxide Nanopar-ticles. *Polimernye Materialy i Tekhnologii = Polymer Ma-terials and Technologies*, 9 (1), 52–58. <https://doi.org/10.32864/polymmattech-2023-9-1-52-58> (in Russian).
- Received: 18.04.2023  
Accepted: 20.06.2023  
Published online: 29.09.2023