

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)
УДК 539.23 : 665.93
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-325-333>

Поступила в редакцию 22.06.2022
Received 22.06.2022

Д. В. Сапсалёв¹, Г. Б. Мельникова², Т. Н. Толстая², С. А. Чижик²

¹Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка, Минск, Беларусь

²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ТОНКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ЖЕЛАТИНА С НЕОРГАНИЧЕСКИМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

Аннотация. Разработана методика формирования тонких пленок желатина и композиционных покрытий с наночастицами диоксида кремния и оксида цинка методом спин-коатинга. Методом атомно-силовой микроскопии получены новые данные о морфологии и структурных характеристиках сформированных желатиновых и наноконпозиционных пленок. Представлены зависимости параметров шероховатости композиционных покрытий от содержания наночастиц диоксида кремния и оксида цинка в полимерной матрице. Показано, что введение неорганических наночастиц в структуру желатина позволяет формировать наноконпозиты с более развитой поверхностью. Установлено, что введение наночастиц диоксида кремния приводит к гидрофобизации поверхности полимер-неорганических пленок на основе желатина, в то время как модификация наночастицами оксида цинка (до 8 мг на 1 мг желатина) позволяет улучшить смачиваемость наноконпозиционных покрытий водой.

Ключевые слова: желатин, наноконпозиционные пленки, спин-коатинг, атомно-силовая микроскопия, неорганические наночастицы

Для цитирования. Тонкие композиционные покрытия на основе желатина с неорганическими наночастицами / Д. В. Сапсалёв [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 325–333. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-325-333>

D. V. Sapsaliou¹, G. B. Melnikova², T. N. Tolstaya², S. A. Chizhik²

¹Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank, Minsk, Belarus

²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus

THIN COMPOSITE COATINGS BASED ON GELATIN WITH INORGANIC NANOPARTICLES

Abstract. A technique for the formation of gelatin thin films and composite coatings with silicon dioxide and zinc oxide nanoparticles by spin coating has been developed. New data of the morphology and structural characteristics of the formed gelatin and nanocomposite films were obtained by atomic force microscopy. The dependences of the roughness parameters of composite coatings on the content of silicon dioxide and zinc oxide nanoparticles in the polymer matrix are presented. It has been shown that the introduction of inorganic nanoparticles into the gelatin structure makes it possible to form nanocomposites with a rough surface. It has been established that the silicon dioxide nanoparticles incorporation leads to hydrophobization of the surface of polymer-inorganic films based on gelatin. Modification with zinc oxide nanoparticles (up to 8 mg per 1 mg of gelatin) improves the wettability of nanocomposite coatings with water.

Keywords: gelatin; nanocomposite films; spin coating; atomic force microscopy; inorganic nanoparticles.

For citation. Sapsaliou D. V., Melnikova G. B., Tolstaya T. N., Chizhik S. A. Thin composite coatings based on gelatin with inorganic nanoparticles. *Vestsi Natsyuanal'най akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 325–333 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-3-325-333>

Введение. Актуальной является разработка новых материалов на основе биополимеров с целью замены синтетических полимерных соединений в различных отраслях науки и техники. К основным достоинствам применения биополимеров можно отнести вариабельность их структуры и свойств, биоразлагаемость, нетоксичность, что особенно актуально в связи с возрастающей нагрузкой на окружающую среду.

Большое внимание исследователей привлекает, в частности, желатин, представляющий собой полидисперсную смесь полипептидов, получаемую в результате гидролиза коллагена [1–3]. Желатин демонстрирует широкий спектр функциональных характеристик, включая хорошие пленкообразующие свойства и способность к формированию гелей. Желатин относится к гидрофиль-

ным полимерам и обладает достаточно высокой прозрачностью в диапазоне видимого спектра, что делает его перспективным материалом для создания оптических сенсоров анализа водных сред [3, 4].

Принцип работы таких устройств основан на визуальной или инструментальной регистрации изменений оптических характеристик системы «полимер–фотометрически активный реагент» после ее взаимодействия с аналитом. Наличие в структуре желатина различных функциональных групп как кислотной (карбоксо- и гидроксигруппы), так и основной (аминогруппы) природы позволяет осуществлять электростатическую иммобилизацию красителей [3].

Структура желатина, построенная из длинных цепных молекул с малым количеством поперечных связей, препятствует формированию жестких блоков в слое полимера, что делает возможным получение желатиновых матриц с достаточно однородным распределением вводимого компонента. Микропористость полимера обеспечивает сохранение стерического доступа к красителю после проведения иммобилизации, что создает благоприятные условия для проведения различных химических процессов с его участием [5].

Так, на основе иммобилизованных в отвержденном желатиновом геле красителей разработан ряд систем для визуально-тестового и фотометрического определения тяжелых металлов, например Zn(II), Cd(II), Pb(II), Ni(II), Fe(III) и др. Пределы обнаружения таких систем сопоставимы с известными тестовыми и твердофазно-спектроскопическими методиками, реализуемыми без предварительного концентрирования [6].

Однако есть и ограничения в применении желатина в качестве основы для создания функциональных материалов, обусловленные его относительно малой механической прочностью. Распространенными подходами к решению задачи улучшения эксплуатационных характеристик биополимеров является их комбинирование с другими полимерами, сшивка или модификация нанонаполнителями [4].

Последний способ приобретает все большее распространение в настоящее время. Внедрение наноразмерных модификаторов в структуру полимеров приводит к формированию новых материалов – нанокомпозитов. Подбор типа модификатора и его размерных характеристик осуществляют исходя из требований, предъявляемых к свойствам формируемого композиционного материала. К наиболее часто применяемым наномодификаторам можно отнести наночастицы металлов и их оксидов [4, 7–10], углеродные нанотрубки [4, 11], графен и оксид графена [4, 12], диоксид кремния [13] и др.

Изменения структурно-морфологических характеристик полимеров, вызванные введением неорганических наномодификаторов, оказывают влияние на их гидрофильные свойства. Так, в работе [14] описана модификация полимерных мембран наночастицами SiO_2 с целью получения супергидрофобных материалов, имеющих перспективы применения для разделения нефти и воды (очистка промышленных сточных вод).

Полимерные покрытия и нанокомпозиты на их основе, выполненные в виде тонких пленок, представляют особый интерес для исследователей благодаря уникальному комплексу свойств, обусловленных размерными эффектами. Одним из наиболее распространенных способов получения таких покрытий является спин-коатинг [2, 15–17]. Реализация процесса заключается в нанесении фиксированного объема раствора вещества в центр вращающейся подложки. Совместное действие центробежной силы и поверхностного натяжения жидкости приводят к образованию равномерного покрытия на поверхности подложки. После испарения остатков растворителя происходит образование пленки толщиной от нескольких нанометров до нескольких микрон [2].

Развитие технологий получения и расширения областей практических приложений тонких полимерных пленок и нанокомпозитов на их основе ставит перед исследователями задачу разработки и внедрения методов комплексного исследования структурных характеристик таких систем. Важнейшим методом, позволяющим осуществлять оценку и контроль структурно-морфологических и локальных механических характеристик тонкопленочных полимерных покрытий, является атомно-силовая микроскопия (АСМ). Достоинства метода: универсальность (позволяет исследовать тонкопленочные материалы различной природы), высокая разрешающая способность,

возможность визуализации участков исследуемой поверхности (в том числе построение 3D-моделей). АСМ предоставляет важную информацию об изменениях морфологии поверхности, вызванных введением наноразмерных модификаторов в структуру полимерной матрицы [18–21].

Актуальной задачей является формирование нанокомпозитов на основе биополимеров (в частности желатина) путем введения неорганических наночастиц в структуру полимерной матрицы, а также получение новых данных об их структурных и физико-механических свойствах, что позволяет разрабатывать новые материалы с требуемым комплексом эксплуатационных характеристик [4, 13].

Цель работы – формирование тонких нанокомпозиционных пленок на основе желатина с наночастицами диоксида кремния и оксида цинка методом спин-коатинга, исследование их структурно-морфологических характеристик и гидрофильных свойств.

Материалы и методы. Тонкие пленки на основе желатина (Sigma-Aldrich, G9391, Type B) формировали на предварительно гидрофилизированных в пероксидно-аммиачной смеси кремниевых подложках (ориентация 111, линейные размеры 1,5×1,5 см) из нейтрального (водного) и кислых растворов с различной концентрацией полимера (от 0,0625 до 0,5 мг/мл). Навеску желатина добавляли к растворителю и оставляли для набухания на 20 мин. После чего выдерживали полученные системы на водяной бане при ≈ 70 °С до полного растворения полимера. Для создания кислой среды использовали растворы HCl с концентрацией 0,1 и 0,01 М, а также ацетатный буфер со следующими объемными соотношениями уксусной кислоты (0,1 М) и ацетата натрия (0,1 М) – 4 : 1, 1 : 1, 1 : 4. Расчетные значения pH данных систем составили 4,16; 4,76; 5,36.

В целях получения пленок с более развитой поверхностью в состав полимерных покрытий вводили наночастицы диоксида кремния (Sigma-Aldrich, $d = 10$ –20 нм) и оксида цинка (Sigma-Aldrich, $d < 100$ нм). Для этого водный раствор желатина ($c = 0,125$ мг/мл) смешивали с суспензиями наночастиц различных концентраций в объемном соотношении 1 : 1. Содержание наночастиц в суспензии для формирования композиционных пленок подбирали экспериментально, исходя из выполнения условий образования стабильной взвеси наночастиц после ультразвуковой обработки (35 кГц, 10 мин). В результате были получены суспензии, представляющие собой наночастицы, диспергированные в растворе желатина, которые использовали для получения тонких композиционных покрытий (далее по тексту указано массовое содержание наночастиц в пересчете на 1 мг желатина). Концентрация желатина во всех суспензиях была одинакова и составляла 0,0625 мг/мл.

Для реализации метода спин-коатинга аликвоту раствора желатина или суспензии желатин-наночастицы объемом 10 мкл прикапывали на подложки, вращающиеся со скоростью 3200 об/мин. Вращение не прекращали в течение 1 мин для удаления растворителя. Исследования структуры поверхности сформированных покрытий проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на установке NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь) с использованием кремниевых кантилеверов FMG 01 (TipsNano, Российская Федерация) со средней жесткостью 3 Н/м и радиусом кривизны кантилевера не более 10 нм.

Гидрофильные свойства поверхности сформированных покрытий оценивали на основании измерения краевого угла смачивания (КУС) по двум рабочим жидкостям: воде и диодметану на установке DSA 100E (Krüss, Германия). КУС определяли построением касательной в трехфазной точке: жидкость–подложка–воздух (метод лежащей капли). Значения удельной поверхностной энергии рассчитывали по модели Оуэнса–Вендта–Рабеля–Кьельбле.

Результаты и их обсуждение. Согласно данным АСМ (область сканирования 5×5 мкм), желатин образует плотные покрытия с сетчатой структурой в рассматриваемом диапазоне концентраций.

На поверхности пленок, сформированных из водных растворов желатина с концентрацией $>0,1$ мг/мл, отмечается наличие глобул, образованных избытком полимера. Формирование тонких пленок желатина из водного раствора с концентрацией 0,0625 мг/мл позволяет получать плотные однородные покрытия с небольшим количеством дефектов (рис. 1, а). Дальнейшее уменьшение концентрации желатина в растворе может приводить к образованию дефектов в пленке, связанных с недостаточным количеством полимера на поверхности подложки в момент формирования

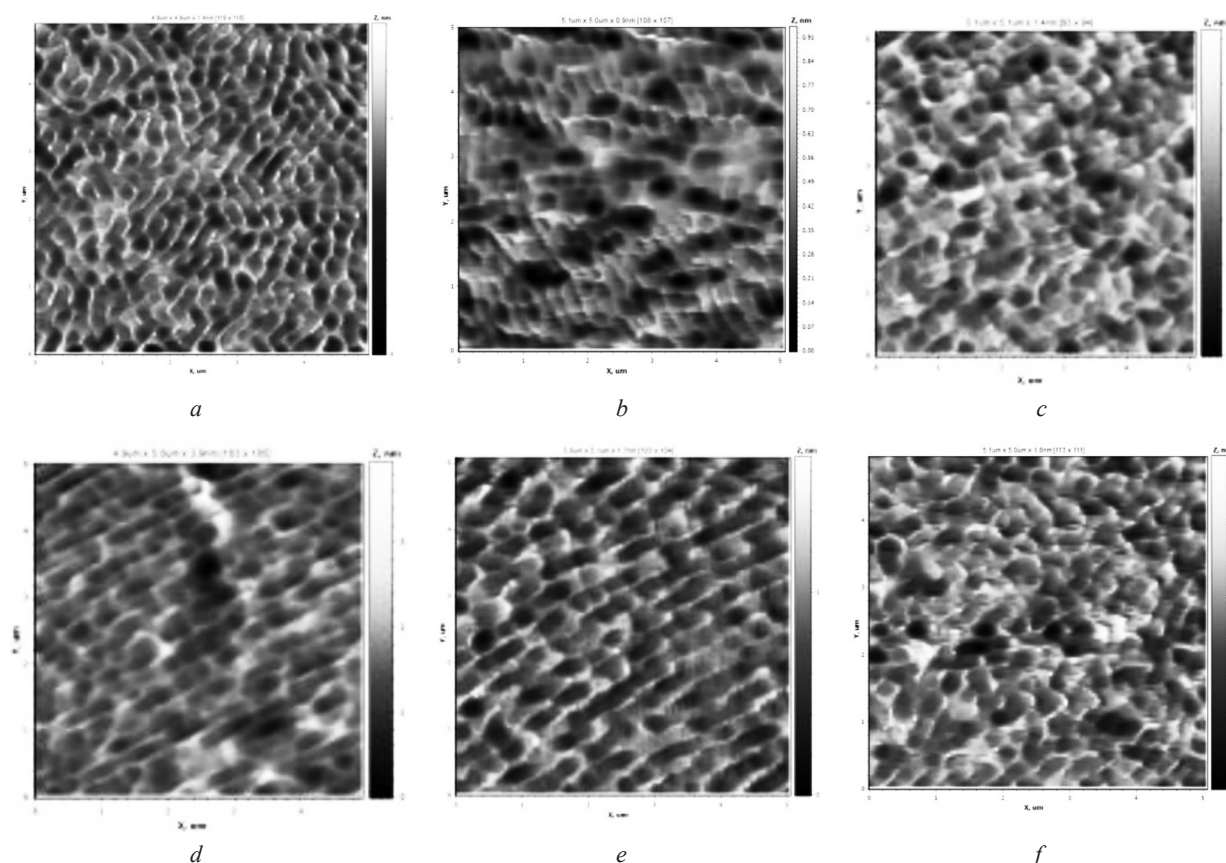


Рис. 1. Структура пленок желатина ($c = 0,0625$ мг/мл), сформированных из водного (*a*) и кислых растворов: *b* – 0,1 М HCl, *c* – 0,01 М HCl, *d* – ацетатный буфер (pH 4,16), *e* – ацетатный буфер (pH 4,76), *f* – ацетатный буфер (pH 5,36)

Fig. 1. Structure of gelatin films ($c = 0.0625$ mg/ml) formed from aqueous (*a*) and acidic solutions: *b* – 0.1 M HCl; *c* – 0.01 M HCl, *d* – acetate buffer (pH 4.16), *e* – acetate buffer (pH 4.76), *f* – acetate buffer (pH 5.36)

покрытия. Оптимальной концентрацией растворов желатина для получения тонких пленок методом спин-коатинга является 0,0625 мг/мл.

Формирование пленок желатина ($c = 0,0625$ мг/мл) из растворов HCl приводит к получению менее однородных пленок по сравнению с водными растворами, что может быть связано с избыточным протонированием аминогрупп, вызывающим образование стержнеобразных структур на поверхности покрытия (рис. 1, *b, c*). Получение тонкопленочных покрытий из ацетатного буфера также приводит к образованию пленок с большим количеством агломератов, что объясняется близостью pH таких растворов к изоэлектрической точке желатина – от 4,8 до 5,1 (рис. 1, *d–f*).

На основании вышеизложенного можно заключить, что наиболее целесообразно осуществлять получение композиционных покрытий на основе желатина из водных растворов без подкисления.

Из суспензий желатина с неорганическими наночастицами формируются пленки с более развитой поверхностью по сравнению с желатиновыми покрытиями (рис. 2–4). Модификация наночастицами диоксида кремния приводит к образованию достаточно однородных покрытий. В структуре данных композитов отмечается наличие конгломератов вытянутой и сферической форм, количество которых возрастает с увеличением содержания наночастиц в суспензии для формирования покрытия (рис. 2). Введение наночастиц оксида цинка в структуру желатина приводит к образованию конгломератов с различными морфометрическими параметрами. Относительно небольшое содержание наночастиц в структуре желатина (4 и 8 мг) позволяет формировать однородные покрытия. Увеличение содержания наночастиц ZnO приводит к формированию конгломератов размерами до 1,1 мкм вследствие агрегации избыточных количеств модификатора (рис. 3).

Изменения в структуре желатиновых покрытий, обусловленные введением наночастиц, отражаются на значениях параметров шероховатости композиционных покрытий. Так, параметры R_a и R_q возрастают по сравнению с аналогичными значениями для покрытий желатина, сформированных

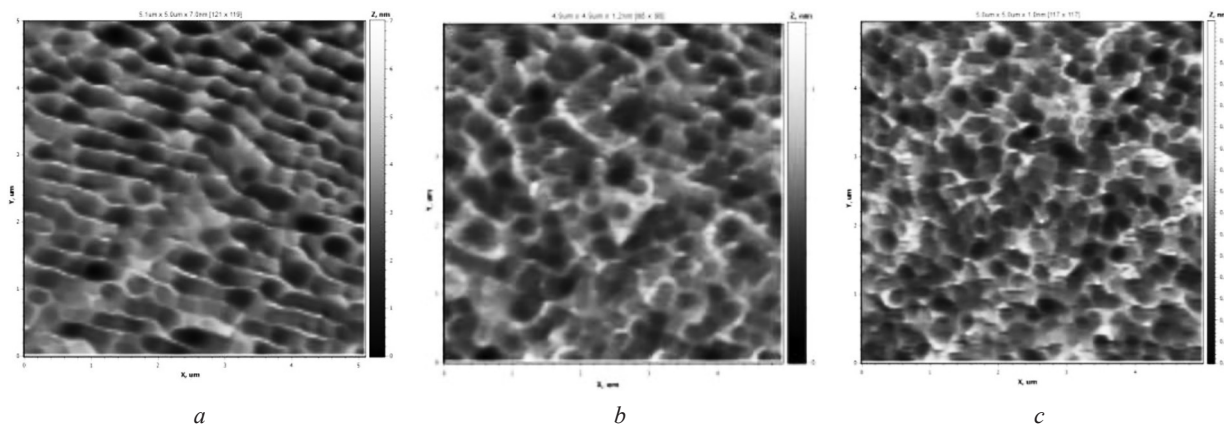


Рис. 2. Структура композиционных пленок желатина с наночастицами диоксида кремния, сформированных из водных суспензий с различным содержанием наночастиц (мг) на 1 мг желатина: *a* – 2, *b* – 4, *c* – 8
 Fig. 2. The structure of composite films of gelatin with silicon dioxide nanoparticles formed from aqueous suspensions with different content of nanoparticles (mg) per 1 mg of gelatin: *a* – 2, *b* – 4, *c* – 8

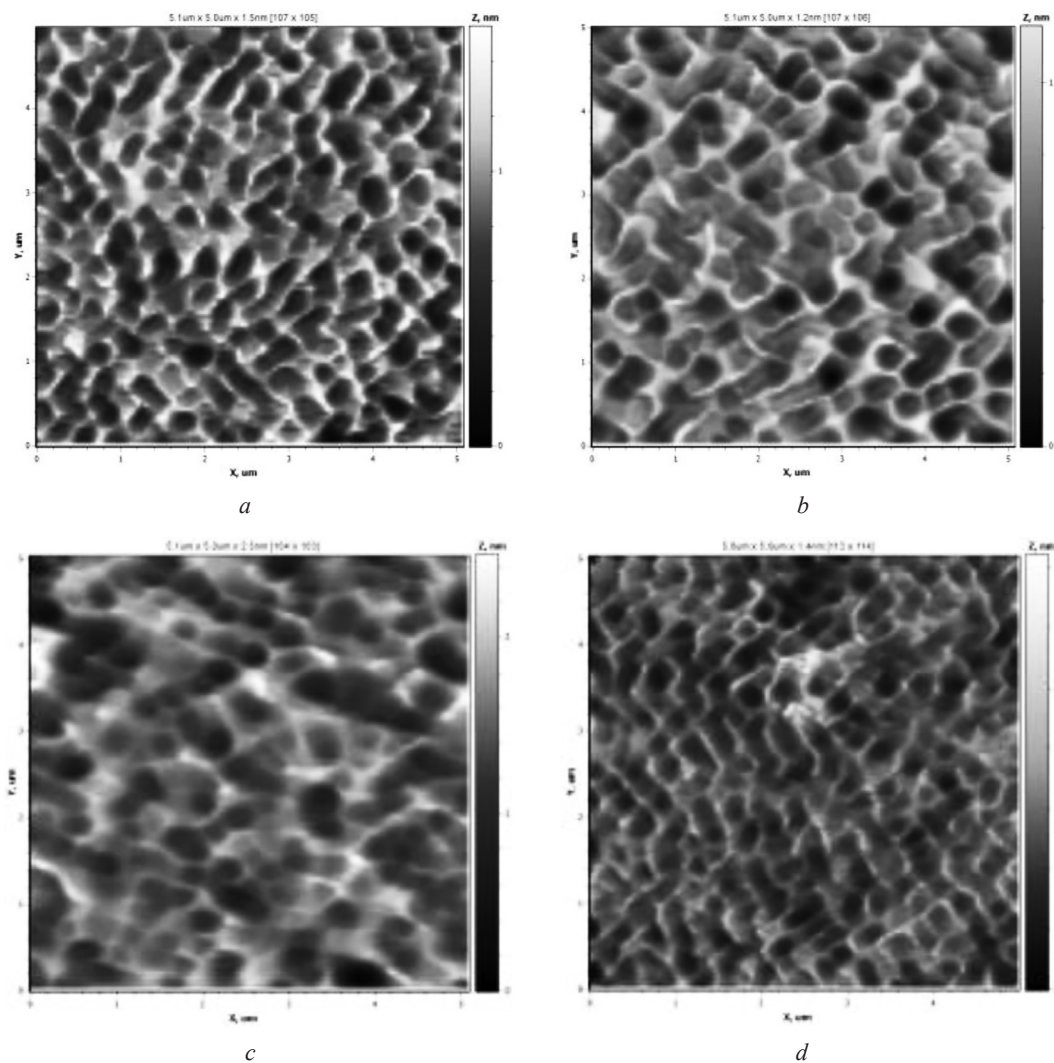


Рис. 3. Структура композиционных пленок желатина с наночастицами оксида цинка, сформированных из водных суспензий с различным содержанием наночастиц (мг) на 1 мг желатина: *a* – 4, *b* – 8, *c* – 16, *d* – 24
 Fig. 3. The structure of composite films of gelatin with zinc oxide nanoparticles formed from aqueous suspensions with different content of nanoparticles (mg) per 1 mg of gelatin: *a* – 4, *b* – 8, *c* – 16, *d* – 24

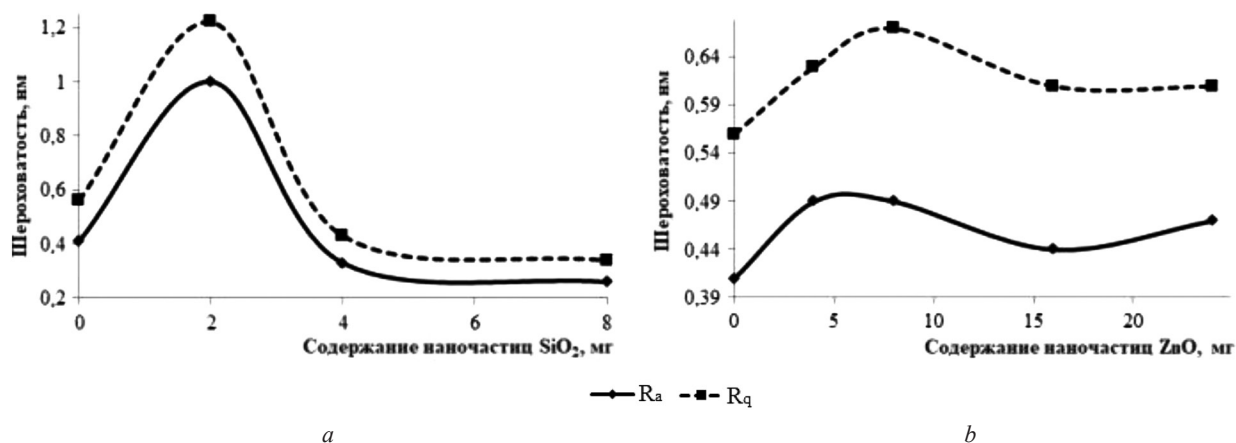


Рис. 4. Зависимость значений наносероховатости от содержания наночастиц SiO_2 (a) и ZnO (b) в полимерной матрице желатина

Fig. 4. Dependence of nanoroughness values on the content of SiO_2 (a) and ZnO (b) nanoparticles in a gelatin polymer matrix

из водного раствора с концентрацией 0,0625 мг/мл ($R_a = 0,41$; $R_q = 0,56$ нм), в случае введения как наночастиц диоксида кремния, так и оксида цинка. Максимальных значений параметры R_a и R_q нанокompозитов достигают при следующем содержании наночастиц: 2 мг для SiO_2 и 8 мг для ZnO .

Дальнейшее увеличение содержания наночастиц приводит к снижению наносероховатости композиционных покрытий, что обусловлено встраиванием наночастиц модификатора и их агломератов в структуру сетки желатина, заполнением собственных дефектов полимерной пленки (рис. 4). Последующее повышение содержания наночастиц приводит к увеличению значений R_a и R_q вследствие формирования достаточно больших конгломератов на поверхности покрытий (рис. 2–4).

Результаты оценки гидрофильных свойств полученных нанокompозитов показали, что наночастицы SiO_2 и ZnO оказывают различное влияние на смачиваемость формируемых покрытий. Введение наночастиц диоксида кремния (2 мг) приводит к увеличению КУС от $55,11^\circ$ до $58,02^\circ$.

Дальнейшее увеличение содержания наночастиц SiO_2 в структуре желатина также сопровождается снижением смачиваемости поверхности нанокompозитов водой вследствие формирования пленок с большим количеством конгломератов (рис. 5, a). В случае введения наночастиц оксида цинка наблюдается увеличение гидрофильных свойств покрытий до содержания наночастиц 8 мг на 1 мг желатина. Большое содержание оксида цинка в составе композитов, как и в случае диоксида

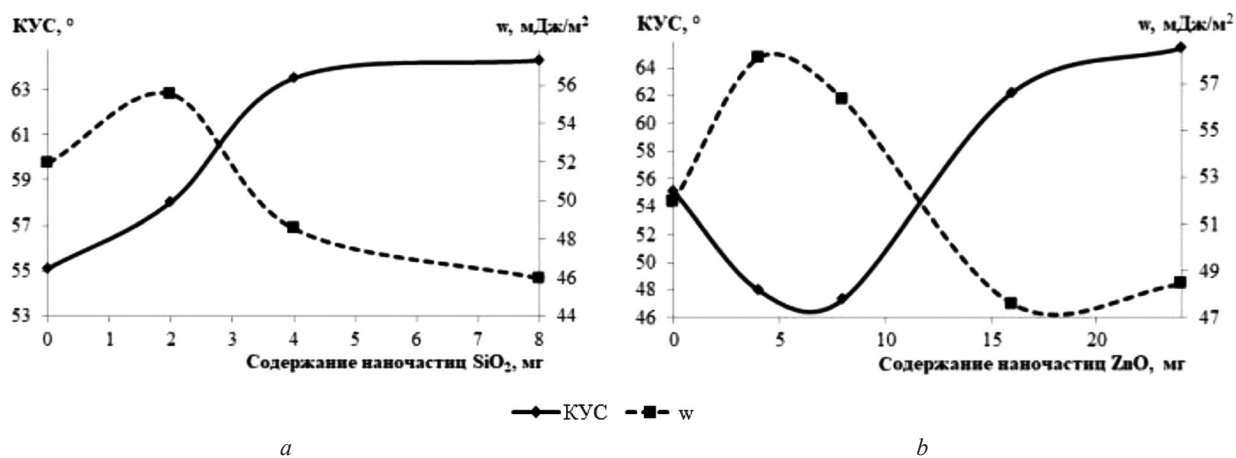


Рис. 5. Зависимость значений КУС и удельной поверхностной энергии от содержания наночастиц SiO_2 (a) и ZnO (b) в полимерной матрице желатина

Fig. 5. Dependence of the CA values and specific surface energy on the content of SiO_2 (a) and ZnO (b) nanoparticles in the gelatin polymer matrix

кремния, приводит к увеличению КУС (рис 5, *b*), что обусловлено неравномерным распределением неорганических наночастиц в структуре желатиновой матрицы.

Заключение. Изучены структурно-морфологические свойства и гидрофильные характеристики композиционных покрытий на основе желатина с наночастицами диоксида кремния и оксида цинка. Установлено, что введение неорганических наночастиц в структуру желатина позволяет формировать пленки с более развитой поверхностью. Характер изменения шероховатости покрытий не зависит от типа наночастиц, а определяется концентрацией наполнителя. Изменения шероховатости, обусловленные инкорпорированием наночастиц не оказывают влияния на гидрофильные свойства сформированных полимер-неорганических покрытий – значения КУС покрытий зависят от природы модификатора и равномерности распределения частиц в полимерной матрице. Сформированные покрытия представляют интерес при разработке селективных слоев с иммобилизованными красителями для датчиков портативных устройств анализа качества воды.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (№ ГР 20220451) и Государственной программы научных исследований на 2021–2025 гг. «Энергетические и ядерные процессы и технологии», подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.25).

Acknowledgements. The work has been performed with the financial support of the Ministry of Education of the Republic of Belarus (№ GR 20220451) and the State Program of Scientific Research for 2021–2025 “Energy and Nuclear Processes and Technologies”, subprogram “Energy Processes and Technologies” (task 2.25).

Список использованных источников

1. Biswas, S. Application of biopolymers as a new age sustainable material for surfactant adsorption: A brief review / S. Biswas, A. Pal // *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. – 2021. – Vol. 2. – P. 100145. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100145>
2. Strategies to Improve the Properties of Amaranth Protein Isolate-Based Thin Films for Food Packaging Applications: Nano-Layering through Spin-Coating and Incorporation of Cellulose Nanocrystals / A. López-Rubio [et al.] // *Nanomaterials*. – 2020. – Vol. 10, N 12. – P. 2564. <https://doi.org/10.3390/nano10122564>
3. Оптические химические сенсоры (микро- и наносистемы) для анализа жидкостей / С. Б. Саввин [и др.] // *Рос. хим. журн. (Журн. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева)*. – 2008. – Т. 52, № 2. – С. 7–16.
4. Yang, Z. Gelatin-Based Nanocomposites: A Review / Z. Yang, S. Chaieb, Y. Hemar // *Polymer Reviews*. – 2021. – Vol. 61, N 4. – P. 765–813. <https://doi.org/10.1080/15583724.2021.1897995>
5. Протолитические и комплексообразующие свойства индикаторов в среде желатинового геля / Е. А. Решетняк [и др.] // *Вісн. Харків. нац. ун-ту. Хімія*. – 2005. – № 669, Вип. 13(36). – С. 67–82.
6. Индикаторные пленки на основе желатинового геля для определения Co(II), Cu(II), Pb(II), Cd(II), Ni(II), Zn(II), Fe(III), Al(III), Ba(II), Sr(II) и SO₄²⁻ / Е. А. Решетняк [и др.] // *Методы и объекты химического анализа*. – 2012. – Т. 7, № 4. – С. 192–201.
7. Булатова, Р. Р. Нанокompозитные гели / Р. Р. Булатова, И. В. Бакеева // *Вестн. МИТХТ*. – 2011. – Т. 6, № 1. – С. 3–21.
8. Nanocomposite films consisting of functional nanoparticles (TiO₂ and ZnO) embedded in 4A-Zeolite and mixed polymer matrices (gelatin and polyvinyl alcohol) / M. Azizi-lalabadi [et al.] // *Food Research International*. – 2020. – Vol. 137. – P. 109716. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109716>
9. Idumah Igwe, C. Novel trends in conductive polymeric nanocomposites, and bionanocomposites / C. Idumah Igwe // *Synthetic Metals*. – 2021. – Vol. 273. – P. 116674. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2020.116674>
10. Tanwar, A. ZnO NPs incorporated gelatin grafted polyacrylamide hydrogel nanocomposite for controlled release of ciprofloxacin / A. Tanwar, P. Date, D. Ootoor. // *Colloid and Interface Science Communications*. – 2021. – Vol. 42. – P. 100413. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100413>
11. Moniruzzaman, M. Polymer Nanocomposites Containing Carbon Nanotubes / M. Moniruzzaman, K. I. Winey // *Macromolecules*. – 2006. – Vol. 39, N 16. – P. 5194–5205. <https://doi.org/10.1021/ma060733p>
12. Development of a nanocomposite scaffold of gelatin–alginate–graphene oxide for bone tissue engineering / S. D. Purohit [et al.] // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2019. – Vol. 133. – P. 592–602. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.113>
13. Hanemann, T. Polymer-Nanoparticle Composites: From Synthesis to Modern Applications / T. Hanemann, D. V. Szabó // *Materials*. – 2010. – Vol. 3, N 6. – P. 3468–3517. <https://doi.org/10.3390/ma3063468>
14. ECTFE hybrid porous membrane with hierarchical micro/nano-structural surface for efficient oil/water separation / J. Pan [et al.] // *Journal of Membrane Science*. – 2017. – Vol. 524. – P. 623–630. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.11.012>
15. Dynamics, crystallization and structures in colloid spin coating / M. Pichumani [et al.] // *Soft Matter*. – 2013. – Vol. 9, N 12. – P. 3220. <https://doi.org/10.1039/c3sm27455a>
16. Toward Sustainable PLA-Based Multilayer Complexes with Improved Barrier Properties / J. R. Rocca-Smith [et al.] // *ACS Sustainable Chem. Eng.* – 2019. – Vol. 7, N 4. – P. 3759–3771. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04064>

17. Environmental friendly and sustainable gas barrier on porous materials: Nanocellulose coatings prepared using spin- and dip-coating / A. M. Herrera [et al.] // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 93, N 5. – P. 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.127>

18. Парфенов, В. А. Атомно-силовая микроскопия и ее применения в науке, технике и реставрации / В. А. Парфенов, И. А. Юдин // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2015. – № 9. – С. 61–70.

19. Optical and morphological characterization by atomic force microscopy of luminescent 2-styrylpyridine derivative compounds with Poly(N-vinylcarbazole) films / E. Pérez-Gutiérrez [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2011. – Vol. 519, N 18. – P. 6015–6020. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.04.129>

20. Recent Applications of Advanced Atomic Force Microscopy in Polymer Science: A Review / P. Nguyen-Tri [et al.] // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, N 5. – P. 1142. <https://doi.org/10.3390/polym12051142>

21. Полетов, Я. А. Исследование плёнок полиметилметакрилата, модифицированного сверхмалыми количествами медь/углеродных нанокмозитов, методом атомной силовой микроскопии / Я. А. Полетов, С. Г. Быстров, В. И. Кодолов // *Хим. физика и мезоскопия*. – 2014. – Т. 16, № 1. – С. 103–108.

References

1. Biswas S., Pal A. Application of biopolymers as a new age sustainable material for surfactant adsorption: A brief review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2021, vol. 2, pp. 100145. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100145>

2. López-Rubio A., Blanco-Padilla A., Oksman K., Mendoza S. Strategies to Improve the Properties of Amaranth Protein Isolate-Based Thin Films for Food Packaging Applications: Nano-Layering through Spin-Coating and Incorporation of Cellulose Nanocrystals. *Nanomaterials*, 2020, vol. 10, no. 12, pp. 2564. <https://doi.org/10.3390/nano10122564>

3. Savvin S. B., Kuznetsov V. V., Sheremetyev S. V., Mikhailova A. V. Optical chemical sensors (Micro- and Nanosystems) for analysis of liquids. *Russian Journal of General Chemistry*, 2008, vol. 78, no. 12, pp. 2418–2429. <https://doi.org/10.1134/s1070363208120244>

4. Yang Z., Chaieb S., Hemar Y. Gelatin-Based Nanocomposites: A Review. *Polymer Reviews*, 2021, vol. 61, no. 4, pp. 765–813. <https://doi.org/10.1080/15583724.2021.1897995>

5. Reshetnyak E. A., Nikitina N. A., Loginova L. P., Mchedlov-Petrosyan N. O., Svetlova N. V. Protolytic and complexing properties of indicators in the gelatin gel medium. *Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo universitetu. Khimiya = Kharkov University bulletin. Chemical series*, 2005, no. 669, vol. 13(36), pp. 67–82 (in Russian).

6. Reshetnyak E. A., Ivchenko N. V., Nikitina N. A., Pochinok T. B. Indikatornye plenki na osnove zhelatinovogo gelja dlja opredelenija Co(II), Cu(II), Pb(II), Cd(II), Ni(II), Zn(II), Fe(III), Al(III), Ba(II), Sr(II) i SO_4^{2-} [Indicator films based on gelatin gel for determination of Co(II), Cu(II), Pb(II), Cd(II), Ni(II), Zn(II), Fe(III), Al(III), Ba(II), Sr(II) and SO_4^{2-}]. *Metody i ob'ekty himicheskogo analiza = Methods and objects of chemical analysis*, 2012, vol. 7, no. 4, pp. 192–201 (in Russian).

7. Bulatova R. R., Bakeeva I. V. Nanocomposite gels. *Vestnik MITHT*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 3–21 (in Russian).

8. Azizi-lalabadi M., Alizadeh-Sani M., Divband B., Ehsani A., Julian McClements D. Nanocomposite films consisting of functional nanoparticles (TiO_2 and ZnO) embedded in 4A-Zeolite and mixed polymer matrices (gelatin and polyvinyl alcohol). *Food Research International*, 2020, vol. 137, pp. 109716. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109716>

9. Idumah Igwe C. Novel trends in conductive polymeric nanocomposites, and bionanocomposites. *Synthetic Metals*, 2021, vol. 273, pp. 116674. <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2020.116674>

10. Tanwar A., Date P., Ottoor D. ZnO NPs incorporated gelatin grafted polyacrylamide hydrogel nanocomposite for controlled release of ciprofloxacin. *Colloid and Interface Science Communications*, 2021, vol. 42, pp. 100413. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2021.100413>

11. Moniruzzaman M. Polymer Nanocomposites Containing Carbon Nanotubes. *Macromolecules*, 2006, vol. 39, no. 16, pp. 5194–5205. <https://doi.org/10.1021/ma060733p>

12. Purohit S. D., Bhaskar R., Singh H., Yadav I., Kumar Gupta M., Chandra Mishra N. Development of a nanocomposite scaffold of gelatin–alginate–graphene oxide for bone tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, vol. 133, pp. 592–602. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.113>

13. Hanemann T., Szabó Hanemann D. V. Polymer-Nanoparticle Composites: *From Synthesis to Modern Applications*. *Materials*, 2010, vol. 3, no. 6, pp. 3468–3517. <https://doi.org/10.3390/ma3063468>

14. Pan J., Xiao C., Huang Q., Liu H., Zhang T. ECTFE hybrid porous membrane with hierarchical micro/nano-structural surface for efficient oil/water separation. *Journal of Membrane Science*, 2017, vol. 524, pp. 623–630. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.11.012>

15. Pichumani M., Bagheri P., Poduska K. M., Gonzalez-Vinas W., Yethiraj A. Dynamics, crystallization and structures in colloid spin coating. *Soft Matter*, 2013, vol. 9, no. 12, pp. 3220. <https://doi.org/10.1039/c3sm27455a>

16. Rocca-Smith J. R., Pasquarelli R., Lagorce-Tachon A., Rousseau J., Fontaine S., Aguié-Beghin V., Debeaufort F., Karbowski T. Toward Sustainable PLA-Based Multilayer Complexes with Improved Barrier Properties. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2019, vol. 7, no. 4, pp. 3759–3771. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04064>

17. Herrera M. A., Sirvio J. A., Mathew A. P., Oksman K. Environmental friendly and sustainable gas barrier on porous materials: Nanocellulose coatings prepared using spin- and dip-coating. *Materials & Design*, 2016, vol. 93, no. 5, pp. 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.127>

18. Parfenov V. A., Yudin I. A. Atomic force microscopy and its applications in science, engineering and restoration. *Izvestiya SPbGETU “LETI” = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2015, no. 9, pp. 61–70 (in Russian).

19. Pérez-Gutiérrez E., Percino M. J., Chapela V. M., Maldonado J. L. Optical and morphological characterization by atomic force microscopy of luminescent 2-styrylpyridine derivative compounds with Poly(N-vinylcarbazole) films. *Thin Solid Films*, 2011, vol. 519, no. 18, pp. 6015–6020. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.04.129>

20. Nguyen-Tri P., Ghassemi P., Carriere P., Nanda S., Assadi A. A., Nguyen D. Recent Applications of Advanced Atomic Force Microscopy in Polymer Science: *A Review. Polymers*, 2020, vol. 12, no. 5, pp. 1142. <https://doi.org/10.3390/polym12051142>

21. Polyotov Ya. A., Bystrov S. G., Kodolov V. I. Issledovanie pljonok polimetilmetakrilata, modifitsirovannogo sverhmalymi kolichestvami med'uglerodnyh nanokompozitov, metodom atomnoj silovoj mikroskopii [Investigation of polymethylmethacrylate films modified with supersmall quantities of copper/carbon nanocomposites by atomic force microscopy]. *Himicheskaya fizika i mezoskopiya = Chemical Physics and Mesoscopy*, 2014, vol. 16, no. 1, pp. 103–108 (in Russian).

Информация об авторах

Сасалёв Дмитрий Владимирович – аспирант, преподаватель. БГПУ им. М. Танка (ул. Советская, 18, 220030, Минск, Беларусь). E-mail: dsapsalev@list.ru

Мельникова Галина Борисовна – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Беларусь). E-mail: galachkax@gmail.com

Толстая Татьяна Николаевна – научный сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Беларусь). E-mail: tolstaya.tn@yandex.ru

Чижик Сергей Антонович – академик НАН Беларуси, д-р техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Беларусь). E-mail: chizhik_sa@tut.by

Information about the authors

Sapsaliou Dmitry V. – Postgraduate student, Teacher. Belarusian State Pedagogical University Named After Maxim Tank (18, Sovetskaya str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dsapsalev@list.ru

Melnikova Galina B. – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovki str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: galachkax@gmail.com

Tolstaya Tatyana N. – Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovki str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tolstaya.tn@yandex.ru

Chizhik Sergei A. – Academician, D. Sc. (Engineering), Professor, Chief Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovki str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chizhik_sa@tut.by