

Таблица 1. Влияние введения наночастиц на смачиваемость пленок на поверхностях, модифицированных перфтордекановой кислотой и суспензий на ее основе

Образец	KУС, вода	w, мДж/м <sup>2</sup>	$\gamma^p$ , мДж/м <sup>2</sup>
Ac	64,6	47,6	11,1
Ac с 1 мг SiO <sub>2</sub>	64,0	47,9	11,4
Ac с 2 мг SiO <sub>2</sub>	66,8	45,8	10,3
Ac с 3 мг SiO <sub>2</sub>	70,9	43,6	8,3

Таблица 2. Шероховатость, сила адгезии и удельная поверхностная энергия (АСМ) на поверхностях, модифицированных перфтордекановой кислотой и суспензий на ее основе

Образец	$R_a$ , нм	$R_q$ , нм	$R_z$ , нм	$F_{ад}$ , нН	w, мДж/м <sup>2</sup>	E, МПа
Ac	0,45	0,92	0,89	5,645	86,6	418,9
Ac с 1 мг SiO <sub>2</sub>	0,24	0,62	0,57	6,487	99,5	394,4
Ac с 2 мг SiO <sub>2</sub>	0,27	0,69	0,83	6,467	99,2	375,8
Ac с 3 мг SiO <sub>2</sub>	0,21	0,39	0,50	6,102	93,6	745,9

УДК 681.586.7

**ТОНКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА  
ДЛЯ АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ КАТИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ**  
Сапсалёв Д.В.<sup>1,2</sup>, Мельникова Г.Б.<sup>1</sup>, Аксютч А.В.<sup>3</sup>, Толстая Т.Н.<sup>1</sup>, Котов Д.А.<sup>3</sup>, Чижик С.А.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси<sup>2</sup>Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка<sup>3</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники<sup>4</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрена возможность модификации никелевых покрытий тонкими пленками полиметилметакрилата и нанокompозитами полиметилметакрилат–наночастицы диоксида кремния для создания емкостных датчиков анализа содержания катионов тяжелых металлов в воде. Показано, что введение наночастиц диоксида кремния в структуру полимерной матрицы позволяет сформировать покрытия с более развитой поверхностью, что приводит к увеличению емкостных характеристиках датчика.

**Ключевые слова:** тонкие пленки полиметилметакрилата, нанокompозиты, атомно-силовая микроскопия, емкостные датчики.

**THIN POLYMERIC FILMS BASED ON POLYMETHYL METACRYLATE  
FOR ANALYSIS OF HEAVY METAL CATIONS IN WATER**  
Sapsaliou D.<sup>1,2</sup>, Melnikova G.<sup>1</sup>, Aksyuchys A.<sup>3</sup>, Tolstaya T.<sup>1</sup>, Kotov D.<sup>3</sup>, Chizhik S.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Sciences of Belarus<sup>2</sup>Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank<sup>3</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>4</sup>Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The possibility of modifying nickel coatings with thin films of polymethyl methacrylate and nanocomposites of polymethyl methacrylate–silicon dioxide nanoparticles to create capacitive sensors for analyzing the content of heavy metal cations in water is considered. It is shown that the introduction of silicon dioxide nanoparticles into the structure of the polymer matrix makes it possible to form coatings with a more developed surface, which leads to an increase in the capacitance characteristics of the sensor.

**Key words:** polymethyl methacrylate thin films, nanocomposites, atomic force microscopy, capacitive sensors.

Адрес для переписки: Сапсалёв Д.В., ул. Советская, 18, Минск 220030, Республика Беларусь  
e-mail: dsapsalev@list.ru

Емкостные датчики широко используются в промышленности, медицине и экологии [1–3]. Несмотря на преимущества применения емкостных датчиков (экономическая эффективность, простота

снижения шероховатости приводит к незначительному увеличению краевого угла смачивания и снижению полярной составляющей удельной поверхностной энергии, определенных методом капли. Т.е. эти изменения приводят к увеличению гидрофобных свойств поверхности.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках задания 3.03.3 ГПНИ «Конвергенция–2025» на 2021–2025 гг.

## Литература

1. Клечковская, В. В. Пленки Ленгмюра-Блоджетт – материалы нанотехнологий настоящего и будущего / Клечковская В. В., Фейгин Л. А. – Вестник РФФИ. – 2014. – № 2 (82). – С. 35–44.

2. Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins. Integr / R. C. Buck [et al.] // Environ. Assess. Manag. – 2011. – Vol. 7. – P. 513–541.

Для решения данной задачи могут быть использованы полимерные покрытия, например, полиметилметакрилата (ПММА) и композиционные полимер-неорганические материалы на их основе [4].

**Экспериментальная часть.** Емкостной датчик состоит из проводящего слоя никеля и селективных покрытий составов ПММА, ПММА–наночастицы диоксида кремния.

Предварительно проводили очистку ситалловых подложек ионным пучком (расход аргона 0,65 л/ч, напряжение разряда 1800 В, ток разряда 30 мА, время 10 мин).

Никелевое покрытие формировали методом ионно-лучевого распыления (установка ВУ-1БСп) в течение 30 мин при расходе рабочего газа 0,49 л/ч, напряжении разряда 3500 В и токе разряда 80 мА. Для формирования рисунка токопроводящего слоя заданной топологии на подложку предварительно закреплялась маска (расстояние от мишени никеля – 200 мм). Толщина сформированных никелевых покрытий составила 100 нм (микроинтерферометр МИИ-4).

Пленки полиметилметакрилата (Sigma-Aldrich,  $M_r \approx 10000$ ) наносили методом спин-коатинга из его раствора в хлороформе с концентрацией 1 мг/мл. Для этого аликвоту раствора полимера объемом 6 мкл прикапывали на подложки, вращающиеся со скоростью 3200 оборотов в минуту. Вращение не прекращали в течение минуты для удаления остаточных количеств растворителя.

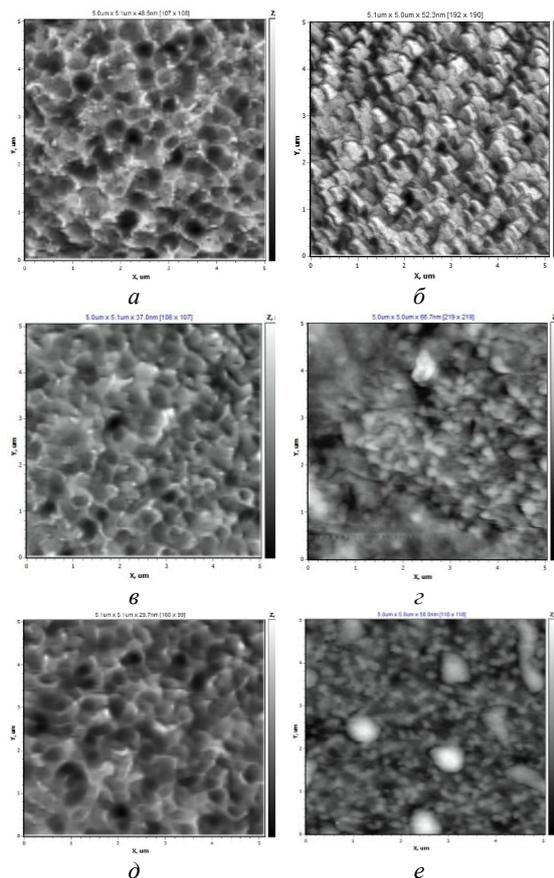
С целью получения пленок, обладающих более развитой поверхностью, в состав полимерных покрытий вводили наночастицы диоксида кремния. Для этого раствор ПММА ( $c = 2$  мг/мл) смешивали с суспензией наночастиц  $\text{SiO}_2$  (Sigma-Aldrich,  $d = 10\text{--}20$  нм) в хлороформе ( $c = 1$  мг/мл), предварительно выдержанной в ультразвуковой ванне (10 мин).

В результате была получена суспензия наночастиц  $\text{SiO}_2$  в растворе ПММА с массовым соотношением полимера и наночастиц 2:1 соответственно.

Исследования структуры поверхности сформированных покрытий проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на установке NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь) с использованием кремниевых кантилеверов FMG 01 (TipsNano, Российская Федерация).

Оценку емкостных характеристик датчика проводили на основании анализа зависимости емкости от частоты (измеритель иммитанса Е7-25) при выдерживании в растворе сульфата никеля (II) в течение 10 минут.

**Результаты и их обсуждение.** Анализ данных атомно-силовой микроскопии показал, что исходная ситалловая подложка и покрытия никеля, сформированные на ее поверхности, имеют однородную структуру (рис. 1, а и б).



а, в, д – ситалл; б, з, е – никель

Рисунок 1 – АСМ-структура ситалловой подложки (а), никелевого покрытия (б), пленок ПММА (в, з) и нанокompозитов ПММА– $\text{SiO}_2$  (д, е)

Формирование тонких пленок ПММА и композитов с наночастицами диоксида кремния на поверхности наноструктурированных никелевых слоев также приводит к получению однородных покрытий на ситалле. В структуре пленок, сформированных на никеле отмечается наличие сферических конгломератов размерами до 900 нм и 800–900 нм для покрытий составов ПММА и ПММА– $\text{SiO}_2$  соответственно (рис. 1, в–е).

Анализ зависимости емкости сформированных на поверхности датчиков покрытий на основе полиметилметакрилата показал, что композиты, имеющие в своем составе наночастицы  $\text{SiO}_2$ , имеют более высокие значения емкости при одинаковой концентрации ионов тяжелых металлов в растворе (на примере ионов  $\text{Ni}^{2+}$ ).

Разработанные датчики демонстрируют линейную зависимость емкости от концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$  в диапазоне 0,01–20 мМ.

Таким образом, нанокompозиты на основе полиметилметакрилата с наночастицами диоксида кремния имеют перспективы применения в качестве селективных покрытий для создания емкостных датчиков анализа содержания тяжелых металлов в воде.

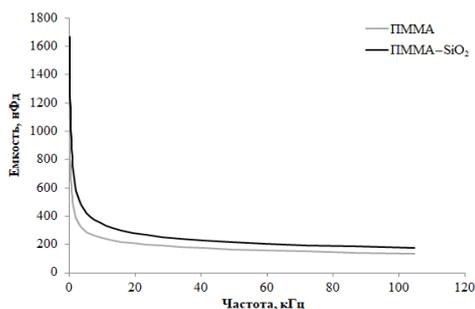


Рисунок 2 – Зависимость емкости сформированных покрытий от частоты в 20 мМ растворе NiSO<sub>4</sub> (время выдерживания датчика 10 мин)

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований на 2021–2025 гг. «Энергетические и ядерные

процессы и технологии», подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.25).

#### Литература

1. Heavy metal ion detection using a capacitive micro-mechanical biosensor array for environmental monitoring / G. Tsekis [et al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical*. – 2015. – Vol. 208. – P.628–635.
2. Rotake, D. Heavy Metal Ion Detection in Water using MEMS Based Sensor / D. Rotake, A. D. Darji // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5. – P. 1530–1536.
3. Resistive and capacitive strain sensors based on customized compliant electrode: Comparison and their wearable applications / T. Dong [et al.] // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2021. – Vol. 326. – P. 112720.
4. A dielectric coating for improved performance of capacitive sensors in allpolymer microfluidic devices / C. Ofenzeller [et al.] // *Microelectronic Engineering*. – 2020. – Vol. 223. – P. 111220.

УДК 621.7.620.186

### ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ БОРА В ПОКРЫТИИ Al-Cr-B-N НА МОРФОЛОГИЮ И ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ

Лапицкая В.А.<sup>1,2</sup>, Кузнецова Т.А.<sup>1,2</sup>, Хабарова А.В.<sup>1</sup>, Чижик С.А.<sup>1,2</sup>, Вархолински Б.<sup>3</sup>, Гилевич А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Кошалинский технологический университет

Кошалин, Польша

**Аннотация.** С помощью атомно-силовой микроскопии проведены исследования влияния содержания бора в покрытии Al-Cr-B-N на морфологию, шероховатость и силу адгезии поверхности. На поверхности покрытия без бора присутствует большое количество частиц и конгломератов. Добавление в покрытие бора (10 и 20 %) приводит к увеличению размеров ячеек на поверхности покрытия, снижению количества частиц, росту шероховатости и силы адгезии.

**Ключевые слова:** покрытие AlCrBN, катодно-дуговое испарение, концентрация, бор, морфология, шероховатость.

### INFLUENCE OF BORON CONCENTRATION IN Al-Cr-B-N COATING ON MORPHOLOGY AND SURFACE ROUGHNESS

Lapitskaya V.<sup>1,2</sup>, Kuznetsova T.<sup>1,2</sup>, Khabarava A.<sup>1</sup>, Chizik S.<sup>1,2</sup>, Warcholinski B.<sup>3</sup>, Gilewicz A.<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>Koszalin Technological University

Koszalin, Poland

**Abstract.** Atomic force microscopy was used to study the influence of the boron content in the Al-Cr-B-N coating on the morphology, roughness, and adhesion force of the surface. A large number of particles and conglomerates are present on the surface of the coating without boron. The addition of boron to the coating (10 and 20%) leads to an increase in the cell size on the coating surface, a decrease in the number of particles, and an increase in roughness and adhesion strength.

**Key words:** AlCrBN coating, cathode-arc evaporation, concentration, boron, morphology, roughness.

Адрес для переписки: Лапицкая В.А., ул. П. Бровки, 15, Минск 220072, Республика Беларусь  
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

**Введение.** Нитриды переходных металлов обладают хорошими механическими и трибологическими свойствами, а также коррозионной стойко-

стью. Такие покрытия нашли широкое промышленное применение в качестве защитных покрытий. Наиболее известны покрытия на основе