

УДК 539.216.2: 544.77

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-131-142>



## Осаждение наночастиц нитрида бора на полиамидные ткани

И.В. Локтионова<sup>1</sup>✉, П.В. Абакумов<sup>2</sup>, А.П. Кузьменко<sup>1</sup>, А.И. Колпаков<sup>1</sup>,  
Е.А. Новиков<sup>1</sup>, В.А. Мамонтов<sup>1</sup>, Л.П. Петрова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

<sup>2</sup> Курский государственный медицинский университет  
ул. К. Маркса, д. 3, г. Курск 305041, Российская Федерация

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

### Резюме

**Цель исследования:** закрепление наночастиц нитрида бора на полиамидную ткань.

**Методы.** Коллоидные системы перемешивались и диспергировались в ультразвуковой ванне QUICK 218-35 при мощности излучателя 50 Вт и ультразвуковом технологическом диспергаторе "Волна" УЗТА-0,4/22-ОМ, активация поверхности полиамидной ткани и ее очищение проводилось плазменной обработкой в установке низкого давления PICO. Осаждение наночастиц методом Ленгмюра – Блоджетт производилось на установке KSV Nima 2002. Морфология и элементный состав полиамидной ткани до и после нанесения наночастиц нитрида бора исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL 6610LV, оснащенного энергодисперсионным рентгеновским анализатором Oxford Instruments X-Max. Методика исследования включала применение режима низкого вакуума для предотвращения накопления поверхностного электрического заряда на диэлектрических образцах.

**Результаты.** Синтезировались седиментационно устойчивые коллоидные системы на основе стабилизированных стеариновой кислотой наночастиц нитрида бора и водного раствора порошка наночастиц нитрида бора с препаративной замасливателем. Наночастицы из первой коллоидной системы осаждались на полиамидную ткань методом Ленгмюра – Блоджетт, из второй – ее погружением в систему с ультразвуковым диспергированием. СЭМ-изображение полиамидной ткани и ее энергодисперсионный анализ подтверждает равномерное закрепление наночастиц нитрида бора на волокнах указанными методами.

**Заключение.** В работе наночастицы нитрида бора закреплялись на полиамидной ткани методом Ленгмюра – Блоджетт и погружением ее в коллоидную систему с ультразвуковым диспергированием, что позволило равномерно осадить наночастицы как на поверхность полиамидной ткани, так и между волокон для улучшения ее эксплуатационных характеристик.

**Ключевые слова:** наночастицы; нитрид бора; полиамидная ткань; коллоидная система; сканирующая электронная микроскопия.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках реализации программы развития ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» проекта «Приоритет 2030».

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Осаждение наночастиц нитрида бора на полиамидные ткани / И.В. Локтионова, П.В. Абакумов, А.П. Кузьменко, А.И. Колпаков, Е.А. Новиков, В.А. Мамонтов, Л.П. Петрова // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 131–142. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-131-142>

Поступила в редакцию 31.10.2024

Подписана в печать 25.11.2024

Опубликована 13.12.2024

© Локтионова И.В., Абакумов П.В., Кузьменко А.П., Колпаков А.И., Новиков Е.А., Мамонтов В.А.,  
Петрова Л.П., 2024

Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии /  
Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies. 2024;14(4):131–142

## Deposition of Boron nitride nanoparticles on polyamide fabrics

Inna V. Loktionova<sup>1</sup>✉, Pavel V. Abakumov<sup>2</sup>, Alexandr P. Kuzmenko<sup>1</sup>,  
Artem I. Kolpakov<sup>1</sup>, Evgeniy A. Novikov<sup>1</sup>, Vladimir A. Mamontov<sup>1</sup>,  
Ludmila P. Petrova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

<sup>2</sup> Kursk State Medical University  
3 K. Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

### Abstract

**Purpose of research.** Fixation of Boron nitride nanoparticles on polyamide fabric.

**Methods.** Colloidal systems were stirred and dispersed in an ultrasonic bath QUICK 218-35 with an emitter power of 50 W and an ultrasonic technological disperser "Volna" UZTA-0.4/22-OM. The activation of the polyamide fabric surface and its cleaning were carried out by plasma treatment in a low-pressure PICO system. Deposition of nanoparticles using the Langmuir-Blodgett method was performed on a KSV Nima 2002 setup. The morphology and elemental composition of the polyamide fabric before and after the application of boron nitride nanoparticles were studied using a JEOL 6610LV scanning electron microscope equipped with an Oxford Instruments X-Max energy-dispersive X-ray analyzer. The research methodology included the use of a low-vacuum mode, which was important for preventing the accumulation of surface electrical charge on dielectric samples.

**Results.** Sediment-resistant colloidal systems were synthesized based on boron nitride nanoparticles stabilized with stearic acid and an aqueous solution of Boron nitride nanoparticle powder with the addition of an oiling agent. Nanoparticles from the first colloidal system were deposited on polyamide fabric using the Langmuir-Blodgett method, while nanoparticles from the second system were applied by immersing the fabric in the system with ultrasonic dispersion. SEM images of the polyamide fabric and its energy-dispersive analysis confirm the uniform fixation of boron nitride nanoparticles on the fibers by these methods.

**Conclusion.** In this work, boron nitride nanoparticles were fixed onto polyamide fabric using the Langmuir-Blodgett method and by immersing the fabric in a colloidal system with ultrasonic dispersion. This allowed for uniform deposition of nanoparticles both on the surface of the polyamide fabric and between the fibers, enhancing its performance characteristics.

**Keywords:** nanoparticles; boron nitride; polyamide fabric; colloidal system; scanning electron microscopy.

**Funding:** The publication was prepared as part of the implementation of the strategic academic leadership program «Priority 2030» Southwest State University.

**Conflict of interest:** The authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Loktionova I.V., Abakumov P.V., Kuzmenko A.P., Kolpakov A.I., Novikov E.A., Mamontov V.A., Petrova L.P. Deposition of Boron nitride nanoparticles on polyamide fabrics. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(4):131–142. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-131-142>

Received 31.10.2024

Accepted 25.11.2024

Published 13.12.2024

\*\*\*

### Введение

Полимерные материалы занимают важное место в современной науке и промышленности благодаря своей высокой химической стойкости, низкой стоимости, легкости обработки и долговечности. Осо-

бый интерес вызывают полимерные композиты, которые применяются в электронике и схмотехнике для создания высокоэффективных систем теплоотвода [1]. Однако одна из ключевых задач материаловедения заключается в улучшении ме-

ханических свойств полимеров при сохранении их уникальных эксплуатационных характеристик [2].

Традиционно для модификации полимерных материалов широко применялись углеродсодержащие соединения, такие как углеродные нанотрубки [3] и оксид графена [4]. Эти модификаторы значительно улучшали теплопроводность и механическую прочность композитов, но ограничивали их применение из-за сложностей в переработке и увеличения электропроводности [5]. Поэтому поиск альтернативных наполнителей стал приоритетной задачей для расширения областей применения полимерных материалов.

Нитрид бора BN представляет собой перспективный материал для модификации полимерных композитов. BN обладает высокой теплопроводностью [6], хорошей механической стабильностью [7], а также высокой устойчивостью к окислению и воздействию агрессивных химических сред [8]. В отличие от углеродных наноматериалов нитрид бора сохраняет электроизоляционные свойства, что делает его уникальным с точки зрения комбинирования тепло- и электроизоляционных характеристик [9]. Его высокая электросопротивляемость и низкие диэлектрические потери делают его идеальным материалом для применения в электронике [10].

Исследования показывают, что гексагональный нитрид бора (*h*-BN) имеет улучшенные свойства диспергирования в полимерных матрицах по сравнению с углеродными аналогами [11]. Это делает BN ценным добавлением при создании теплопроводящих, но одновременно электроизоляционных полимерных композитов [12]. В последние годы были разработаны наночастицы и мембраны на основе полимерных композитов с BN [13], которые применяются в процессах обратного осмоса и для опреснения воды [14]. Также создаются полимерные композиты с BN,

модифицированные стеариновой кислотой, что способствует повышению теплопроводности материалов [15].

В работе [16] представлен метод нанесения двумерных наночастиц *h*-BN на поверхность хлопчатобумажной ткани. В этом исследовании использовалась зондовая ультразвуковая обработка для подготовки суспензии отшелушенных наночастиц BN в деионизированной воде с добавлением диэтилентриамин. Ткань погружалась в подготовленный раствор и выдерживалась при температуре 60°C в течение 2 часов с использованием магнитного перемешивания, что обеспечивало надежное закрепление наночастиц BN на волокнах хлопка.

Аналогичные подходы применялись и в других исследованиях, направленных на увеличение огнестойкости тканей. В работе [17] наносились наночастицы BN на хлопчатобумажную ткань для улучшения огнестойкости и повышения её функциональных свойств. Благодаря наличию гидроксильных групп в составе целлюлозы, из которой состоит хлопчатобумажная ткань, наночастицы BN способны образовывать прочные связи с её волокнами. В отличие от натуральных волокон синтетические волокна, такие как полиамид, сложнее модифицировать из-за отсутствия реакционноспособных функциональных групп.

В данной работе предложены эффективные методы осаждения наночастиц BN на полиамидные ткани для улучшения их функциональных свойств, что открывает новые перспективы в создании высокоэффективных теплоотводящих и огнестойких материалов на основе синтетических волокон.

Применение нитрида бора в полимерных композитах выходит за рамки теплопроводящих и электроизоляционных материалов. Исследования показали, что добавление BN улучшает устойчивость к воздействию ультрафиолетового излучения, что делает его полезным для создания

материалов, сохраняющих свои свойства под воздействием солнечного света [18]. Это свойство особенно важно для внешних применений, таких как покрытия для зданий и автомобильные детали. Вдобавок благодаря высокой химической инертности BN можно использовать в средах с агрессивными химическими веществами, что расширяет возможности его применения в различных отраслях, включая медицинскую и пищевую промышленность [19].

Методы модификации синтетических волокон BN продолжают развиваться, и в последние годы были предложены новые подходы, включающие использование плазменной обработки и функционализации поверхности тканей для улучшения адгезии наночастиц. Такие методы позволяют создавать более прочные и долговечные композиты, обладающие сочетанием теплопроводности, механической прочности и электроизоляционных свойств. Исследования в данной области обещают значительное расширение спектра применения полимерных материалов с добавками BN, что может привести к созданию новых поколений функциональных тканей и композитов.

### Материалы и методы

В работе синтезировались коллоидные системы (КС) на основе коммерческого порошка нитрида бора. Для синтеза КС<sub>1</sub> использовался метод химической конденсации. На начальной стадии х. ч. стеариновая кислота (C<sub>17</sub>H<sub>35</sub>COOH) растворялась в гексане в соотношении 1:1. Параллельно с этим порошок наночастиц BN растворялся в хлороформе. Полученные растворы подвергались смешиванию в ультразвуковой ванне при мощности излучателя 50 Вт в течение 5 минут. Вторая коллоидная система КС<sub>2</sub> готовилась на водной основе с использованием деионизированной воды и добавлением 11%-ного

замазливателя. Обработка КС<sub>2</sub> проводилась в ультразвуковой ванне (УЗВ) в течение 60 минут, что способствовало диспергированию и перемешиванию частиц. Образцы полиамидной ткани размером 2×3 см предварительно очищались методом плазменной обработки в установке низкого давления в течение 60 минут для удаления примесей и активации поверхности.

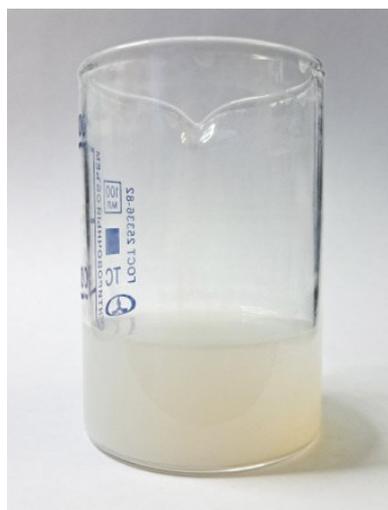
Для осаждения КС<sub>1</sub> методом Ленгмюра – Блоджетт полиамидная ткань, жестко натянутая в металлической рамке-держателе, симметричной с обеих сторон, для обеспечения равномерного распределения наночастиц нитрида бора при переносе на ткань и предотвращения возможных ее деформаций, закреплялась в диппере и в автоматическом режиме опускалась в субфазу, в роли которой выступала дистиллированная вода. На поверхность субфазы при нормальных условиях пикнометром наносилась КС<sub>1</sub> объемом 3 мкл. Скорость движения барьеров в установке и диппера задавалась программно и составляла 5 мм/мин. Весь процесс закрепления наночастиц BN на ткань включал 8 подъемов и 7 опусканий в соответствии с методом Ленгмюра – Блоджетт. Полученный образец полиамидной ткани с закрепленными наночастицами BN в семи нанесённых слоях сушился на воздухе 3 часа.

В КС<sub>2</sub> полиамидная ткань опускались вручную при ультразвуковом диспергировании (УЗД) с мощностью излучателя 40 Вт на частоте 22 кГц и без УЗД. Продолжительность УЗД выбиралась таким образом, чтобы температура коллоидной системы, увеличивающаяся в процессе обработки, не превышала 50°C. Суммарное время обработки УЗД составило 7 минут. После осаждения ткань также высушивалась при комнатной температуре в течение 3 часов.

## Результаты и их обсуждение

Синтезированные КС проявляют стабильность в течение длительного времени (рис. 1). Наночастицы нитрида бора равномерно распределены в дисперсионной среде и явная коагуляция частиц не наблюдается, что указывает на эффективное взаимодействие между стабилизатором и наночастицами. В качестве стабилизатора в системе КС<sub>1</sub> использовалась химически чистая (х.ч.) стеариновая кислота. Применение данного стабилизатора для наночастиц нитрида бора основано на взаимодействии между карбоксильной группой (-COOH) кислоты и атомами бора и азота на поверхности наночастиц посредством водородной связи или ван-дер-

ваальсовых взаимодействий, как это описано ранее в [18]. Эти взаимодействия способствуют образованию защитного слоя на поверхности частиц, предотвращающего их слипание и обеспечивающего устойчивость системы. При этом гидрофобная углеводородная цепь стеариновой кислоты образует двойной электрический слой, действующий как барьер, предотвращающий агрегацию частиц за счет стерического отталкивания. Данная структура препятствует образованию крупных агрегатов и значительно снижает агломерацию наночастиц, улучшая их диспергируемость в неполярных и органических растворителях.



а



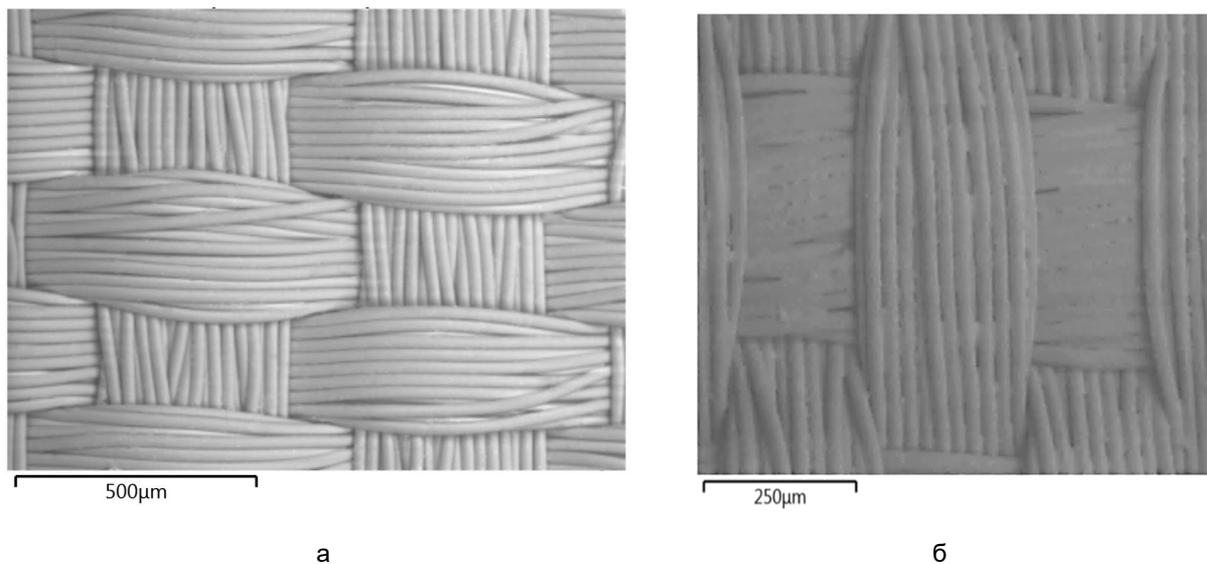
б

Рис. 1. Синтезированные коллоидные системы нитрида бора: а – КС<sub>1</sub>; б – КС<sub>2</sub>

Fig. 1. Synthesized colloidal systems of boron nitride: а – colloidal system 1; б – colloidal system 2

Полиамидная ткань имеет плотное переплетение, при котором нить основы чередуется с каждой нитью утка, создавая прочную, плотную структуру ткани сетчатого типа с гладкой и равномерной поверхностью (рис. 2, а). Диаметр нити в составе полиамидной ткани составляет порядка 400 мкм, а видимая поверхность нити включает в среднем около 13 филаментов с диаметром до 30 мкм. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) изображения полиамидной ткани

(рис. 2, б) после нанесения наночастиц нитрида бора методом погружения в КС<sub>2</sub> демонстрирует четко различимую структуру, на поверхности и между волокнами которой видны светлые включения ВН в виде слегка «вдавленных» участков, что свидетельствует о прочной фиксации частиц на волокне. Важно отметить, что процесс ультразвуковой диспергации не нарушил целостность волокон полиамидной ткани, что подтверждает безопасность метода для структуры материала.



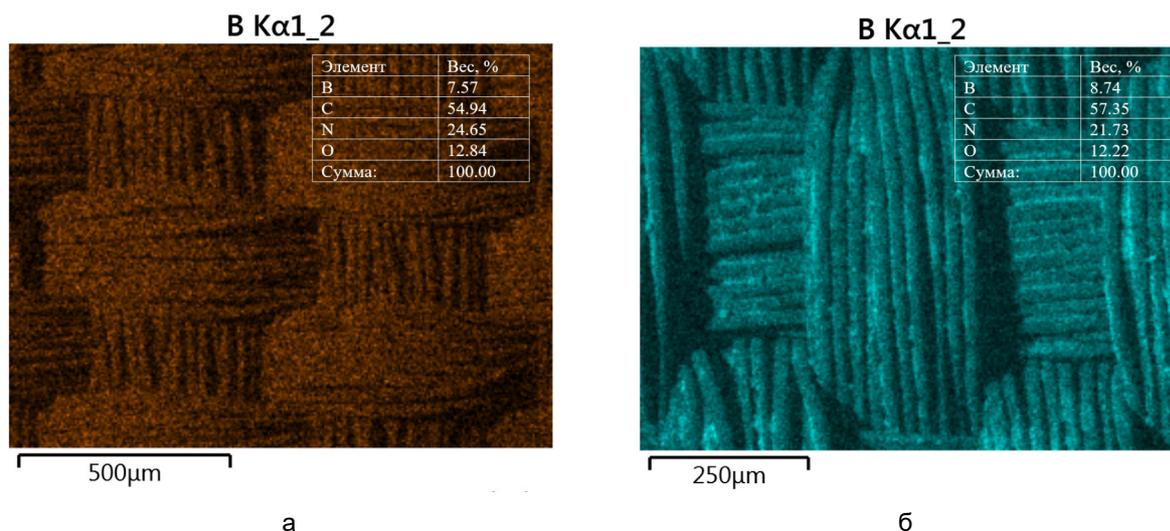
**Рис. 2.** СЭМ-изображение структуры полиамидной ткани до (а) и после (б) закрепления наночастиц нитрида бора погружением в  $КС_2$  с УЗД

**Fig. 2.** SEM image of the polyamide fabric structure before (a) and after (б) fixing boron nitride nanoparticles by immersion in colloidal system 2 with ultrasound

Закрепление наночастиц нитрида бора без применения УЗД в системе  $КС_2$  не наблюдалось, что указывает на важность данного этапа для успешной обработки ткани. Метод ультразвуковой диспергации создает высокочастотные акустические волны, индуцирующие кавитацию. Этот процесс сопровождается выделением значительного количества энергии, что приводит к созданию локальных потоков и микротурбулентности в растворе. Кавитационные пузырьки, образующиеся в процессе, при схлопывании высвобождают энергию, способствующую равномерному распределению частиц BN по всему объему дисперсионной среды и улучшению их проникновения в поры ткани. В результате наночастицы BN равномерно распределяются по всему объему дисперсионной среды, а их взаимодействие с полиамидной тканью становится более эффективным за счет увеличения площади контакта. Кавитация также спо-

собствует улучшенному проникновению частиц в микроструктуры ткани, повышая прочность сцепления за счет механического закрепления и увеличения адсорбционных сил [20].

Энергодисперсионный анализ с помощью карт распределения химического элемента бора подтверждает закрепление наночастиц BN на волокнах ткани как при методе Ленгмюра – Блоджетт (рис. 3, а), так и при погружении в систему  $КС_2$  (рис. 3, б). Это подтверждается также таблицами на вставках, содержащими данные по химическому составу всех элементов. Азот при картировании не использовался, т. к. входит в состав полиамидных волокон ткани ( $(-NH-(CH_2)_5-CO-)_n$ ) и не позволяет точно определить успешность нанесения наночастиц. Анализ распределения элементов демонстрирует устойчивое закрепление наночастиц BN на волокнах ткани.

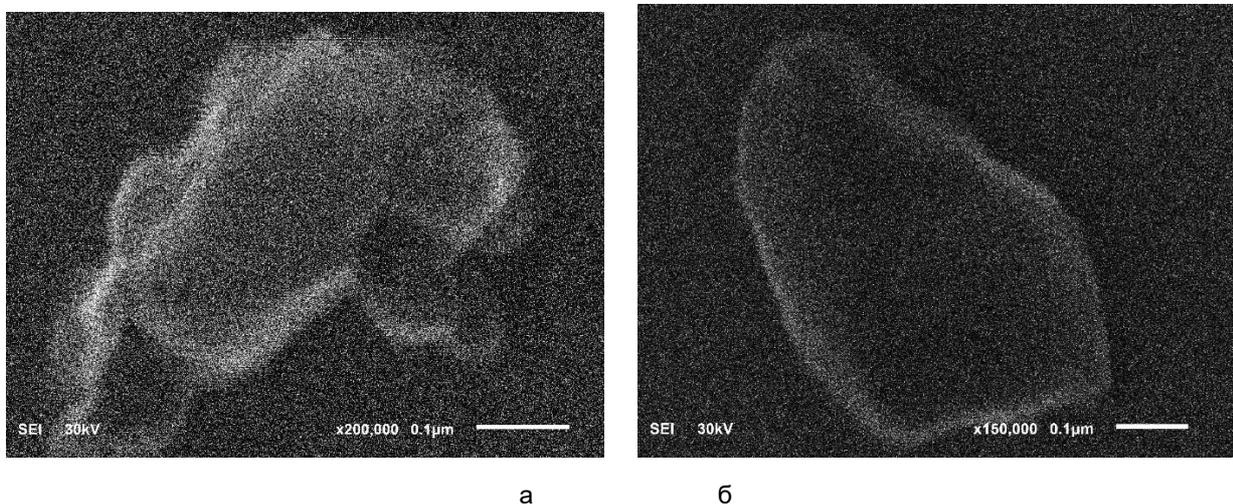


**Рис. 3.** Данные элементного анализа на полиамидной ткани после закрепления наночастиц нитрида бора: а – методом Ленгмюра – Блоджетт из КС<sub>1</sub>; б – погружением в КС<sub>2</sub> с УЗД

**Fig. 3.** Data of elemental analysis on polyamide fabric after fixing boron nitride nanoparticles: а – by Langmuir-Blodgett method from colloidal system 1; б – immersion in colloidal system 2 with ultrasound

Увеличенные СЭМ-изображения наночастиц нитрида бора на поверхности полиамидной ткани показывают как многослойные структуры (рис. 4, а), так и отдельные частицы размером от 150 до

200 мкм (рис. 4, б). Закрепленные нанопластины BN имеют значительный контакт с поверхностью волокна, что может способствовать улучшению распределения тепла и механических свойств ткани.



**Рис. 4.** СЭМ-изображение наночастиц нитрида бора на полиамидной ткани: а – слоистые структуры; б – отдельные частицы

**Fig. 4.** SEM image of boron nitride nanoparticles on polyamide fabric: а – layered structures; б – individual particles

Предполагается, что такие структуры обеспечивают более эффективную передачу тепла за счет увеличенной площади контакта с волокнами, а также повышают

устойчивость материала к механическим воздействиям. Комплексный подход к анализу структуры и свойств ткани позволяет сделать вывод о том, что применение

ультразвуковой диспергации в сочетании с использованием стеариновой кислоты в качестве стабилизатора способствует созданию стабильных композитных материалов с улучшенными характеристиками.

### Выводы

В представленной работе проведен синтез стабильных коллоидных систем на основе наночастиц BN, обладающих продолжительной устойчивостью и равномерным распределением частиц в дисперсионной среде. Коллоидные системы наносились на полиамидную ткань с использованием метода Ленгмюра – Блоджетт, а также методом погружения ткани в коллоидные системы с последующим ультразвуковым диспергированием и без него. Применение ультразвуковой обработки способствовало генерации микротурбулентных потоков и формирования кавитационных пузырьков, что значительно повышало уровень взаимодей-

ствия наночастиц с поверхностью ткани и обеспечивало их проникновение в структуру волокон. Это позволяло достигнуть более глубокой интеграции наночастиц в материал без нарушения его структурной целостности. Результаты энергодисперсионного рентгеновского анализа и сканирующей электронной микроскопии подтвердили успешное присутствие и равномерное распределение наночастиц нитрида бора на поверхности полиамидной ткани. Исследования показали наличие многослойных структур и индивидуально закрепленных наночастиц размером порядка 150–200 мкм. Эти наблюдения демонстрируют высокую эффективность предложенных методов синтеза и нанесения, позволяя модифицировать ткань и улучшить ее функциональные свойства, такие как механическая прочность, устойчивость к износу и возможное расширение спектра применения в технических и защитных материалах.

### Список литературы

1. Hexagonal Boron nitride-based composites: an overview of processing approaches and mechanical properties / M.R. Abdul Karim, M.A. Khan, A.U. Zaman, A. Hussain // *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2023. Vol. 60, is. 1. P. 1-23. <https://doi.org/10.1007/s43207-022-00251-8>
2. Spray coating of 2D materials in the production of antifouling membranes for membrane distillation / C. Skuse, M. Alberto, J.M. Luque-Alled, V.O. Mercadillo, E. Asuquo, A. Gallego-Schmid, P. Gorgojo // *Journal of Membrane Science*. 2024. Vol. 711. P. 123162. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123162>
3. Strategies for optimizing interfacial thermal resistance of thermally conductive hexagonal Boron nitride/polymer composites: A review / P. Jia, L. An, L. Yu, Y. Pan, H. Fan, L. Qin // *Polymer Composites*. 2024. Vol. 45, is. 12. P. 10587–10618. <https://doi.org/10.1002/pc.28521>
4. Design and fabrication of morphologically controlled carbon nanotube/polyamide-6-based composites as electrically insulating materials having enhanced thermal conductivity and elastic modulus / T. Morishita, Y. Katagiri, T. Matsunaga, Y. Muraoka, K. Fukumori // *Composites Science and Technology*. 2017. Vol. 142. P. 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.01.022>
5. Molahalli V., Sharma A., Bijapur K., Soman G., Chattham N., Hegde G. Low-cost bio-waste carbon nanocomposites for sustainable electrochemical devices: A systematic review // *Materials Today Communications*. 2024. Vol. 38. P. 108034. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108034>
6. Facile synthesis and the thermal properties of Al/Si composites prepared via fast hot-pressing sintering / J. Jia, X. Hei, Z. Li, W. Zhao, Y. Wang, Q. Zhuo, Y. Li // *Metals*. 2023. Vol. 13, is. 10. P. 1787. <https://doi.org/10.3390/met13101787>
7. Improvement of the thermal/electrical conductivity of PA6/PVDF blends via selective MWCNTs-NH<sub>2</sub> distribution at the interface / Z. Zhang, M. Cao, P. Chen, B. Yang, B. Wu, J. Miao,

J. Qian // *Materials & Design*. 2019. Vol. 177. P. 107835. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107835>

8. Tahir M.Y., Ahmad A., Luque R. 9 MOF—a promising material for energy applications // *Metal-Organic Framework Composites. Vol. 1. ZIF-8 Based Materials for Pharmaceutical Waste* / ed. by Awais Ahmad, Muhammad Pervaiz, Zohaib Saeed, Rafael Luque, Mabkhoot Alsaieri and Farid A. Harraz. Vol. 1. De Gruyter, 2023. P. 109. <https://doi.org/10.1515/9783110792607-009>

9. Thermal conductivity and mechanical properties of polymer composites with hexagonal Boron nitride – a comparison of three processing methods: injection moulding, powder bed fusion and casting / N.B.D. Do, K. Imenes, K.E. Aasmundtveit, H.V. Nguyen, E. Andreassen // *Polymers*. 2023. Vol. 15, is. 6. P. 1552. <https://doi.org/10.3390/polym15061552>

10. Boron and nitrogen isotope effects on hexagonal Boron nitride properties / E. Janzen, H. Schutte, J. Plo, A. Rousseau, T. Michel, W. Desrat [et al.] // *Advanced Materials*. 2024. Vol. 36, is. 2. P. 2306033. <https://doi.org/10.1002/adma.202306033>

11. Structural and electronic properties of 2D (graphene, hBN)/H-terminated diamond (100) heterostructures / P.S. Mirabedini, B. Debnath, M.R. Neupane, P. Alex Greaney, A. Glen Birdwell, D. Ruzmetov [et al.] // *Applied Physics Letters*. 2020. Vol. 117, is. 12. P. 121901. <https://doi.org/10.1063/5.0020620>

12. The hBN defects database: a theoretical compilation of color centers in hexagonal Boron nitride / C. Cholsuk, A. Zand, A. Çakan, T. Vogl // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2024. Vol. 128, is. 30. P. 12716–12725. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c03404>

13. Interfacial engineering to tailor the properties of multifunctional ultralight weight hBN-polymer composite aerogels / S. Ozden, N. S. Dutta, K. Randazzo, T. Tsafack, C. B. Arnold, R. D. Priestley // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. Vol. 13, is. 11. P. 13620–13628. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c16866>

14. Thermally conductive, electrically insulating epoxy pads with three-dimensional polydopamine-modified and Silver nanoparticle-functionalized hexagonal Boron nitride networks / L. Liu, D. Bai, Y. Li, X. Yu, J. Li, G. Gan // *ACS Applied Polymer Materials*. 2023. Vol. 5, is. 10. P. 8043–8052. <https://doi.org/10.1021/acsapm.3c01269>

15. Avsarala S., Bose S. 2D nanochannels and huge specific surface area offer unique ways for water remediation and adsorption: assessing the strengths of hexagonal Boron nitride in separation technology // *Functional Composite Materials*. 2023. Vol. 4, is. 1. P. 5. <https://doi.org/10.1186/s42252-023-00042-2>

16. Significant improvement of thermal conductivity of polyamide 6/Boron nitride composites by adding a small amount of stearic acid / H. Fang, G. Li, K. Wang, F. Wu // *Polymers*. 2023. Vol. 15, is. 8. P. 1887.

17. 2D hexagonal Boron nitride-coated cotton fabric with self-extinguishing property / R.S. Ambekar, A. Deshmukh, M.Y. Suárez-Villagrán, R. Das, V. Pal, S. Dey [et al.] // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020. Vol. 12, is. 40. P. 45274–45280. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c12647>

18. Flame-retardant activity of modified Boron nitride nanosheets to cotton / H. Liu, Y. Du, S. Lei, Z. Liu // *Textile Research Journal*. 2020. Vol. 90, is. 5–6. P. 512–522. <https://doi.org/10.1177/0040517519871260>

19. Кинетика коллоидной системы стабилизированного нитрида бора на водной субфазе / И.В. Локтионова, А.П. Кузьменко, А.И. Жакин, В.М. Емельянов, П.В. Абакумов, Ю.А. Неручев [и др.] // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2023. Т. 13, № 3. С. 211–223. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-211-223>

20. Impact of surface chemistry and particle size on inertial cavitation driven transport of silica nanoparticles and microparticles / T.B. Alina, S.A. Saemundsson, L.E. Mortensen, Y. Xu, J.W. Medlin, J.N. Cha [et al.] // *Advanced Functional Materials*. Wiley, 2024. P. 2412344.

## References

1. Abdul Karim M. R., Khan M. A., Zaman A. U., Hussain A. Hexagonal Boron nitride-based composites: an overview of processing approaches and mechanical properties. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 2023;60(1):1-23. <https://doi.org/10.1007/s43207-022-00251-8>
2. Skuse C., Alberto M., Luque-Alled J.M., Mercadillo V.O., Asuquo E., Gallego-Schmid A., et al. Spray coating of 2D materials in the production of antifouling membranes for membrane distillation. *Journal of Membrane Science*. 2024;711:123162. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123162>
3. Jia P., An L., Yu L., Pan Y., Fan H., Qin L. Strategies for optimizing interfacial thermal resistance of thermally conductive hexagonal boron nitride/polymer composites: A review. *Polymer Composites*. 2024;45(12):10587-10618. <https://doi.org/10.1002/pc.28521>
4. Morishita T., Katagiri Y., Matsunaga T., Muraoka Y., Fukumori K. Design and fabrication of morphologically controlled carbon nanotube/polyamide-6-based composites as electrically insulating materials having enhanced thermal conductivity and elastic modulus. *Composites Science and Technology*. 2017;142:41-49. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.01.022>
5. Molahalli V., Sharma A., Bijapur K., Soman G., Chattham N., Hegde G. Low-cost bio-waste carbon nanocomposites for sustainable electrochemical devices: A systematic review. *Materials Today Communications*. 2024;38:108034. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108034>
6. Jia J., Hei X., Li Z., Zhao W., Wang Y., Zhuo Q., Li Y. Facile synthesis and the thermal properties of Al/Si composites prepared via fast hot-pressing sintering. *Metals*. 2023;13(10):1787. <https://doi.org/10.3390/met13101787>
7. Zhang Z., Cao M., Chen P., Yang B., Wu B., Miao J., Qian J. Improvement of the thermal/electrical conductivity of PA6/PVDF blends via selective MWCNTs-NH<sub>2</sub> distribution at the interface. *Materials & Design*. 2019;177:107835. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107835>
8. Tahir M.Y., Ahmad A., Luque R. 9 MOF—a promising material for energy applications. In: Ahmad A., Pervaiz M., Saeed Z., et al. (eds.) *Metal-Organic Framework Composites. Vol. 1. ZIF-8 Based Materials for Pharmaceutical Waste*. De Gruyter; 2023. 109 p. <https://doi.org/10.1515/9783110792607-009>
9. Do N.B.D., Imenes K., Aasmundtveit K.E., Nguyen H.V., Andreassen E. Thermal conductivity and mechanical properties of polymer composites with hexagonal Boron nitride – A comparison of three processing methods: injection moulding, powder bed fusion and casting. *Polymers*. 2023;15(6):1552. <https://doi.org/10.3390/polym15061552>
10. Janzen E., Schutte H., Plo J., Rousseau A., Michel T., Desrat W., Edgar J. H. Boron and nitrogen isotope effects on hexagonal boron nitride properties. *Advanced Materials*. 2024;36(2):2306033. <https://doi.org/10.1002/adma.202306033>
11. Mirabedini P.S., Debnath B., Neupane M.R., Alex Greaney P., Glen Birdwell A., Ruzmetov D., et al. Structural and electronic properties of 2D (graphene, hBN)/H-terminated diamond (100) heterostructures. *Applied Physics Letters*. 2020;117(12):121901. <https://doi.org/10.1063/5.0020620>
12. Cholsuk C., Zand A., Çakan A., Vogl T. The hBN defects database: a theoretical compilation of color centers in hexagonal Boron nitride. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2024;128(30):12716-12725. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.4c03404>
13. Ozden S., Dutta N.S., Randazzo K., Tsafack T., Arnold C.B., Priestley R.D. Interfacial engineering to tailor the properties of multifunctional ultralight weight hBN-polymer composite aerogels. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021;13(11):13620-13628. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c16866>
14. Liu L., Bai D., Li Y., Yu X., Li J., Gan G. Thermally conductive, electrically insulating epoxy pads with three-dimensional polydopamine-modified and silver nanoparticle-functionalized hexagonal Boron nitride networks. *ACS Applied Polymer Materials*. 2023;5(10):8043-8052. <https://doi.org/10.1021/acsapm.3c01269>

15. Avasarala S., Bose S. 2D nanochannels and huge specific surface area offer unique ways for water remediation and adsorption: assessing the strengths of hexagonal boron nitride in separation technology. *Functional Composite Materials*. 2023;4(1):5. <https://doi.org/10.1186/s42252-023-00042-2>
16. Fang H., Li G., Wang K., Wu F. Significant improvement of thermal conductivity of polyamide 6/Boron nitride composites by adding a small amount of stearic acid. *Polymers*. 2023;15(8):1887.
17. Ambekar R.S., Deshmukh A., Suárez-Villagrán M.Y., Das R., Pal V., Dey S., et al. 2D hexagonal Boron nitride-coated cotton fabric with self-extinguishing property. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020;12(40):45274-45280. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c12647>
18. Liu H., Du Y., Lei S., Liu Z. Flame-retardant activity of modified boron nitride nanosheets to cotton. *Textile Research Journal*. 2020;90(5-6):512-522. <https://doi.org/10.1177/0040517519871260>
19. Loktionova I.V., Kuzmenko A.P., Zhakin A.I., Emelyanov V.M., Abakumov P.V., Neruchev Yu.A., et al. Kinetics of a colloidal system of stabilized boron nitride on an aqueous subphase. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2023;13(3):211-223. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-3-211-223>
20. Alina T.B., Saemundsson S.A., Mortensen L.E., Xu Y., Medlin J.W., Cha J.N., et al. Impact of Surface Chemistry and Particle Size on Inertial Cavitation Driven Transport of Silica Nanoparticles and Microparticles. In: *Advanced Functional Materials*. Wiley; 2024. P. 2412344.

## Информация об авторах / Information about the Authors

**Локтионова Инна Владимировна**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru, ORCID: 0009-0005-7272-2939

**Inna V. Loktionova**, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru, ORCID: 0009-0005-7272-2939

**Абакумов Павел Владимирович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, информатики и математики, Курский государственный медицинский университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: abakumovpavel18@gmail.com, ORCID: 0009-0009-1055-4019

**Pavel V. Abakumov**, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Physics, Informatics and Mathematics Department, Kursk State Medical University, Kursk, Russian Federation, e-mail: abakumovpavel18@gmail.com, ORCID: 0009-0009-1055-4019

**Кузьменко Александр Павлович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

**Alexander P. Kuzmenko**, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of the Regional Center for Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: apk3527@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7089-0692

**Колпаков Артем Игоревич**, аспирант,  
Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: artem.kolpakov.96@mail.ru,  
ORCID: 0009-0004-8571-8544

**Artem Ig. Kolpakov**, Post-Graduate Student,  
Southwest State University, Kursk, Russian  
Federation,  
e-mail: artem.kolpakov.96@mail.ru,  
ORCID: 0009-0004-8571-8544

**Новиков Евгений Александрович**, кандидат  
физико-математических наук, преподаватель  
кафедры нанотехнологий, микроэлектроники,  
общей и прикладной физики, Юго-Западный  
государственный университет, г. Курск,  
Российская Федерация,  
e-mail: novikov.2403@mail.ru,  
ORCID: 0000-0002-8824-1540

**Evgeniy A. Novikov**, Candidate of Sciences  
(Physics and Mathematics), Teacher of the  
Department of Nanotechnology, Microelectronics,  
General and Applied Physics, Southwest State  
University, Kursk, Russian Federation,  
e-mail: novikov.2403@mail.ru,  
ORCID: 0000-0002-8824-1540

**Мамонтов Владимир Александрович**, пре-  
подаватель кафедры нанотехнологий, микро-  
электроники, общей и прикладной физики,  
Юго-Западный государственный университет,  
г. Курск, Российская Федерация,  
e-mail: vladimir-mamontov2013@yandex.ru,  
ORCID: 0000-0003-0592-3851

**Vladimir A. Mamontov**, Lecturer of the Depart-  
ment of Nanotechnology, Microelectronics,  
General and Applied Physics, Southwest State  
University, Kursk, Russian Federation,  
e-mail: vladimir-mamontov2013@yandex.ru,  
ORCID: 0000-0003-0592-3851

**Петрова Людмила Павловна**, кандидат  
физико-математических наук, доцент кафедры  
нанотехнологий, микроэлектроники, общей  
и прикладной физики, Юго-Западный  
государственный университет, г. Курск,  
Российская Федерация,  
e-mail: luci78@mail.ru,  
ORCID: 0009-0007-8883-5983

**Ludmila P. Petrova**, Candidate of Sciences  
(Physics and Mathematics), Associate Professor of  
the Department of Nanotechnology, Micro-  
electronics, General and Applied Physics,  
Southwest State University, Kursk,  
Russian Federation,  
e-mail: luci78@mail.ru,  
ORCID: 0009-0007-8883-5983