

УДК 538.951

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-95-105>



Исследование фазового состава и микротвёрдости композиционных материалов на основе акриловой смолы с включением наночастиц диоксида титана и частиц диоксида церия

А.И. Колпаков¹✉, В.А. Мамонтов¹, В.М. Пауков¹, С.А. Беляев¹,
М.А. Пугачевский¹, А.И. Жакин¹, А.С. Сизов¹

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

✉ e-mail: artem.kolpakov.96@mail.ru

Резюме

Цель исследования. Получение композиционных материалов методом горячего прессования с различным процентным соотношением наночастиц диоксида титана и диоксида церия, исследование их фазового состава и микротвёрдости.

Методы. Методом горячего прессования получены композиционные материалы с включением наночастиц диоксида титана и частиц диоксида церия с их различным процентным содержанием в образцах. Методом атомно-силовой микроскопии определен нанометровый размер частиц в порошке диоксида титана. Показано наличие частиц диоксида титана и диоксида церия в полученных композиционных материалах методом рентгеноструктурной дифрактометрии. Методом Виккерса установлено среднее значение микротвёрдости композиционных образцов.

Результаты. Получены композиционные материалы диаметром 40 мм и толщиной 9 мм на основе акриловой смолы с различным процентным составом порошков диоксида церия и титана в образцах. Анализ АСМ-изображений порошка диоксида титана позволяет отметить наличие как наноразмерных частиц, так и их агломератов в нём. По результатам рентгеноструктурного анализа выявлено наличие частиц диоксида церия и наночастиц диоксида титана в композиционных образцах и отсутствия в них примесей других веществ. Определена фаза анатаз в TiO_2 . Установлено, что при добавлении в акриловую матрицу частиц диоксида церия и наночастиц диоксида титана микротвёрдость композиционных материалов увеличивается.

Заключение. В данной работе описан способ получения композиционных материалов методом горячего прессования. Установлено, что значения микротвёрдости композиционных материалов увеличиваются от роста процентного содержания в них наполнителей. Рост микротвёрдости композиционных материалов предположительно обусловлен межмолекулярным взаимодействием смеси наполнителей и акриловой смолы между собой в процессе её плавления.

Ключевые слова: диоксид титана; диоксид церия; горячее прессование; композиционные материалы; фазовый состав; микротвёрдость.

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ и министерства образования и науки Курской области (Соглашения № 23-29-10198, № 173).

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

© Колпаков А.И., Мамонтов В.А., Пауков В.М., Беляев С.А., Пугачевский М.А., Жакин А.И., Сизов А.С., 2025

Для цитирования: Исследование фазового состава и микротвёрдости композиционных материалов на основе акриловой смолы с включением наночастиц диоксида титана и частиц диоксида церия / А.И. Колпаков, В.А. Мамонтов, В.М. Пауков, С.А. Беляев, М.А. Пугачевский, А.И. Жакин, А.С. Сизов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 1. С. 95–105. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-95-105>.

Поступила в редакцию 08.12.2024

Подписана в печать 14.01.2025

Опубликована 26.03.2025

Study of phase composition and microhardness of composite materials based on acrylic resin with inclusion of Titanium dioxide nanoparticles and Cerium dioxide particles

Artem I. Kolpakov¹✉, Vladimir A. Mamontov¹, Vladimir M. Paukov¹,
Sergey A. Belyaev, Maksim A. Pugachevskii¹, Anatoly I. Zhakin¹,
Alexander S. Sizov¹

¹ Southwest State University
50 Let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: artem.kolpakov.96@mail.ru

Abstract

Purpose of the study. Obtaining composite materials by hot pressing with different percentage ratios of Titanium dioxide and Cerium dioxide nanoparticles, studying their phase composition and microhardness.

Methods. Composite materials with inclusion of titanium Dioxide nanoparticles and Cerium dioxide particles with their different percentage content in samples were obtained by hot pressing. The nanometer size of particles in titanium dioxide powder was determined by atomic force microscopy. The presence of titanium dioxide and cerium dioxide particles in the obtained composite materials was shown using X-ray diffractometry. The average value of microhardness of composite samples was determined by the Vickers method.

Results. Composite materials with a diameter of 40 nm and a thickness of 9 nm based on acrylic resin with different percentage composition of Cerium dioxide and Titanium dioxide powders in the samples were obtained. Analysis of AFM images of titanium dioxide powder allows us to note the presence of both nanosized particles and their agglomerates in it. According to the results of X-ray structural analysis, the presence of cerium dioxide particles and titanium dioxide nanoparticles in the composite samples and the absence of impurities of other substances in them were revealed. The anatase phase in TiO₂ was determined. It was found that when Cerium dioxide particles and titanium dioxide nanoparticles are added to the acrylic matrix, the microhardness of the composite materials increases.

Conclusion: This paper describes a method for producing composite materials using hot pressing. It has been established that the microhardness values of composite materials increase with the growth of the percentage of fillers in them. The growth of the microhardness of composite materials is presumably due to the intermolecular interaction of the filler mixture and acrylic resin with each other during its melting.

Keywords: Titanium dioxide; Cerium dioxide; hot pressing; composite materials; phase composition; microhardness.

Funding: The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation and the Ministry of Education and Science of the Kursk Region (Agreements No. 23-29-10198, No. 173).

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

For citation Kolpakov A.I., Mamontov V.A., Paukov V.M., Belyaev S.A., Pugachevskii M.A., Zhakin A.I., Sizov A.S. Study of phase composition and microhardness of composite materials based on acrylic resin with inclusion of Titanium dioxide nanoparticles and Cerium dioxide particles. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(1):95–105. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-1-95-105>.

Received 08.12.2024

Accepted 14.01.2025

Published 26.03.2025

Введение

Акриловые смолы являются основным материалом для изготовления зубных и черепно-лицевых протезов [1]. Полимер обладает хорошей биосовместимостью для тканей полости рта, нерастворим, характеризуется отсутствием специфических вкусовых свойств. Физические характеристики полиметилметакрилата включают его размерную стабильность, упругость, устойчивость к сжатию [2]. Однако у полиметилметакрилата есть недостатки механических свойств, например, прочность на изгиб, твердость [3], плотность и термостойкость [4], которые необходимы для долгосрочного клинического использования. В работе [3] описано, что в полиметилметакрилат были включены три различных оксида металлов в разных процентных соотношениях, а именно диоксид титана, диоксид циркония и оксид алюминия. В итоге все образцы проявили более высокую устойчивость к ударам по сравнению с полиметилметакрилатом без включений наполнителей.

Для улучшения физико-механических свойств различных стоматологических биоматериалов композиты армировались неорганическими нанонаполнителями, например, диоксидом циркония [5]. Были исследованы физико-механические свойства различных композитов для их стоматологического применения [6]. В работе [7] выполнен систематический обзор влияния добавления диоксида циркония на полиметилметакрилат. Исследования показали, что уменьшение размера армирующих частиц до наноразмера может полностью изменить способ их взаимодействия с матрицей либо за счет увеличения площади поверхности, либо за счет возможных взаимодействий с матрицей в молекулярной сфере, изменяя химические характеристики матрицы [8]. Металлический материал на основе церия, такой как диоксид церия, может выступать в качестве катализатора и обуславливает рост

значений величин, таких как сопротивление сжатию и тепловое расширение керамики [9]. Наночастицы диоксида церия проявили антибактериальные свойства после обработки полиакриловой кислотой [10].

Наночастицы диоксида титана TiO_2 химически инертны, устойчивы к коррозии и нетоксичны [11]. Они имеют высокий показатель преломления и антибактериальные свойства [12]. Для наличия данных характеристик в композиционных материалах наночастицы TiO_2 включаются в полимерные материалы, такие как полиметилметакрилат [13] и эпоксидный гибридный материал [14]. В работе [15] указаны высокоактивные термические, фотокаталитические и антибактериальные свойства кальцинированных композитов $nano-TiO_2$ /полимер. В различных исследованиях показано, что у композитов с включением наночастиц диоксида церия и диоксида титана улучшаются физико-химические свойства, например, фотокаталитические свойства [16], термическая стабильность [17]. В работе [18] указано, что включение наночастиц диоксида титана, диоксида церия и диоксида кремния в матрицу полиметилметакрилата значительно повысило микротвёрдость по Виккерсу (20 – 25 HV) композиционных материалов.

В данной работе описано получение композиционных материалов на основе акриловой смолы с включением частиц диоксида церия и наночастиц диоксида титана методом горячего прессования. Представлены исследования их фазового состава и влияния процентного содержания в них наполнителей на величину значений микротвёрдости.

Материалы и методы

Для получения композиционных материалов с порошковыми наполнителями были использованы следующие материалы: акриловая смола в качестве полимер-

ной матрицы, порошки наночастиц диоксида титана и частиц диоксида церия класса «ХЧ». Размер частиц порошка диоксида церия по паспортным данным составлял 5 мкм. Для выявления наличия наноразмерных частиц в порошке диоксида титана было выполнено исследование методом атомно-силовой микроскопии. Образцы наночастиц диоксида титана были получены следующим образом. Порошок диоксида титана помещался в водную среду, диспергировался 30 минут и наносился на монокристаллический

кремний капельным путём в количестве одной капли.

Были спрессованы композиционные образцы с различным процентным составом в них наполнителей. Для получения этих образцов был использован гидравлический пресс OPAL 460. Всего было спрессовано 12 образцов диаметром 40 мм, толщиной 9 мм и массой 20 г. Также был спрессован нулевой образец, который являлся эталонным и не содержал наполнителей. В таблице 1 подробно расписано различное процентное содержание наполнителей в 12 композиционных образцах.

Таблица 1. Различное процентное содержание наполнителей в композиционных образцах

Table 1. Different percentages of fillers in composite samples

Процентное содержание наполнителей, %	Композиционные образцы		
	1, АС + CeO ₂ 19 г + 1 г	2, АС + TiO ₂ 19 г + 1 г	3, АС + CeO ₂ + TiO ₂ 19 г + 0,5 г + 0,5 г
20	4, АС + CeO ₂ 16 г + 4 г	5, АС + TiO ₂ 16 г + 4 г	6, АС + CeO ₂ + TiO ₂ 16 г + 2 г + 2 г
	7, АС + CeO ₂ 14 г + 6 г	8, АС + TiO ₂ 14 г + 6 г	9, АС + CeO ₂ + TiO ₂ 14 г + 3 г + 3 г
40	10, АС + CeO ₂ 12 г + 8 г	11, АС + TiO ₂ 12 г + 8 г	12, АС + CeO ₂ + TiO ₂ 12 г + 4 г + 4 г

Примечание. Аббревиатурой АС обозначена акриловая смола.

Перед процессом прессования в кофемолке смешивались смеси порошков. Время механического измельчения и перемешивания порошков в кофемолке составляло 5 мин. В дальнейшем они засыпались в пресс-форму. Время прессования образцов составляло 15 мин, температура 190°C, давление – 245 бар, время охлаждения образцов 15 мин. С целью дальнейшего исследования на микротвёрдость для избегания неточностей измерения полученные образцы полировались на полуавтоматическом полировальном станке Buehler Vector LC. Для придания образцу глянцевої поверхности и вскрытия зернистой структуры композиционных образцов использовались полировальные круги

с различным размером зерна, мкм: 320, 600 и 1000.

Размеры наночастиц диоксида титана определяли с помощью атомно-силового микроскопа СЗМ SmartSPM™-1000. Фазовый состав композиционных образцов исследовали с помощью рентгеновского дифрактометра ЕММА. Были исследованы 4 композиционных материала: 3, 6, 9, 12 (табл. 1).

Для исследования микротвёрдости композиционных материалов с включением наночастиц диоксида титана и частиц диоксида церия методом Виккерса был использован программно-аппаратный комплекс для измерения микротвёрдости на базе Q10A+. Как отмечалось ранее,

была произведена подготовка образцов. Были исследованы 4 образца: 3, 6, 9, 12 (см. табл. 1). Параметры измерения микротвёрдости композиционных образцов составляли: воздействия алмазного наконечника индентора на образец 30 с, основная нагрузка 0,05 г·с, количество точек измерения на композиционных материалах 30. Выбор параметров прессования обусловливался анализом литературных данных [18]. Задавалась расстановка точек на композиционных образцах по прямой линии от центра к краю. По завершении измерений оператором задавались линии, которые ограничивали диагонали отпечатков индентора, что позволяло определить значения величины твердости композиционных образцов.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1 продемонстрированы АСМ-изображения наночастиц из образца порошка диоксида титана.

Из АСМ-изображений видно наличие в порошке диоксида титана частиц и их агломератов нанометрового размера. В работе [3] указано, что по сравнению с частицами микронного размера наночас-

тицы TiO_2 обеспечивают термостойкость и улучшенные армирующие свойства, не теряют свойств в процессе полимеризации при высоких температурах, способствуя контролю полимеризационной усадки.

На рисунке 2 представлены дифрактограммы от композиционных образцов 3, 6, 9, 12 в диапазоне углов 2θ от 20° до 60° .

На представленных дифрактограммах (рис. 2) видно присутствие наполнителей в композиционных образцах и отсутствие в них примесей других веществ. Следует отметить, что наночастицы диоксида титана находятся в анатазной фазе. Данные о характерных пиках наполнителей взяты из базы программы Match. Обращает на себя внимание разница между интенсивностью характерных пиков диоксида церия и диоксида титана в композиционных материалах. Это объясняется различным процентным содержанием наполнителей в исследуемых композиционных образцах.

На рисунке 3 продемонстрированы следы от индентора на композиционных образцах с добавлением частиц диоксида церия и наночастиц диоксида титана.

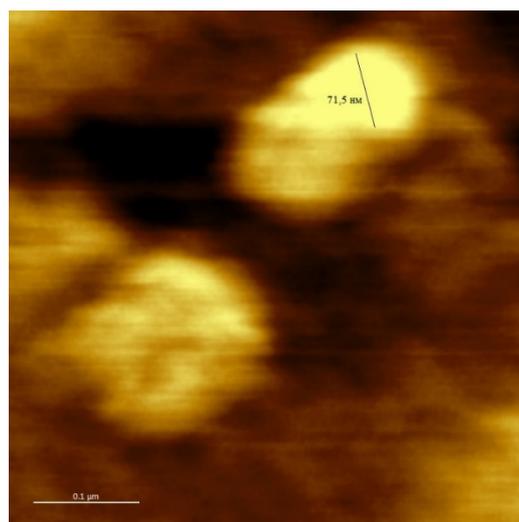
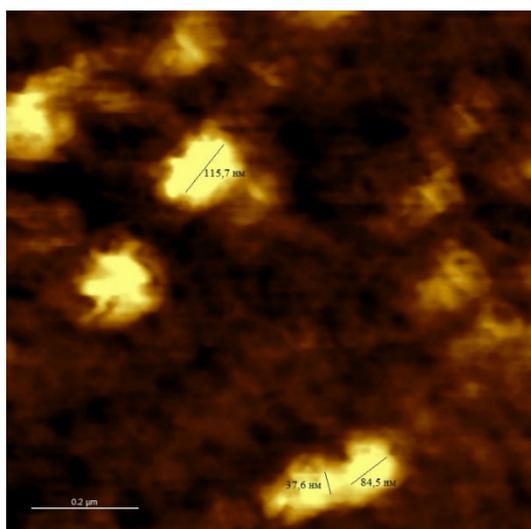


Рис. 1. АСМ-изображения наночастиц диоксида титана

Fig. 1. AFM images of titanium dioxide nanoparticles

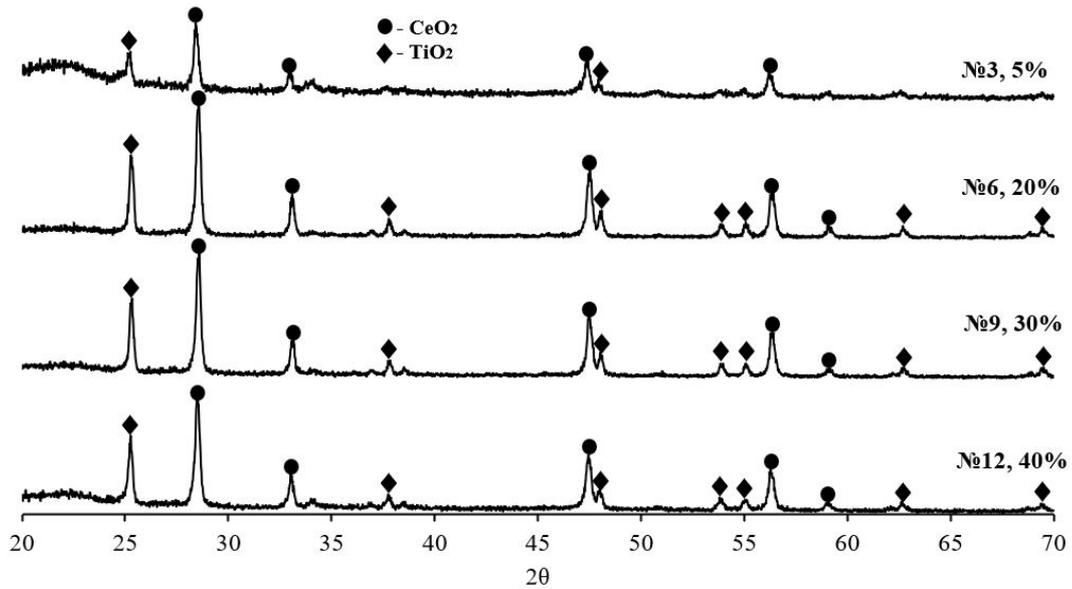


Рис. 2. Диффрактограммы от композиционных образцов 3, 6, 9, 12

Fig. 2. Diffraction patterns of composite samples 3, 6, 9, 12

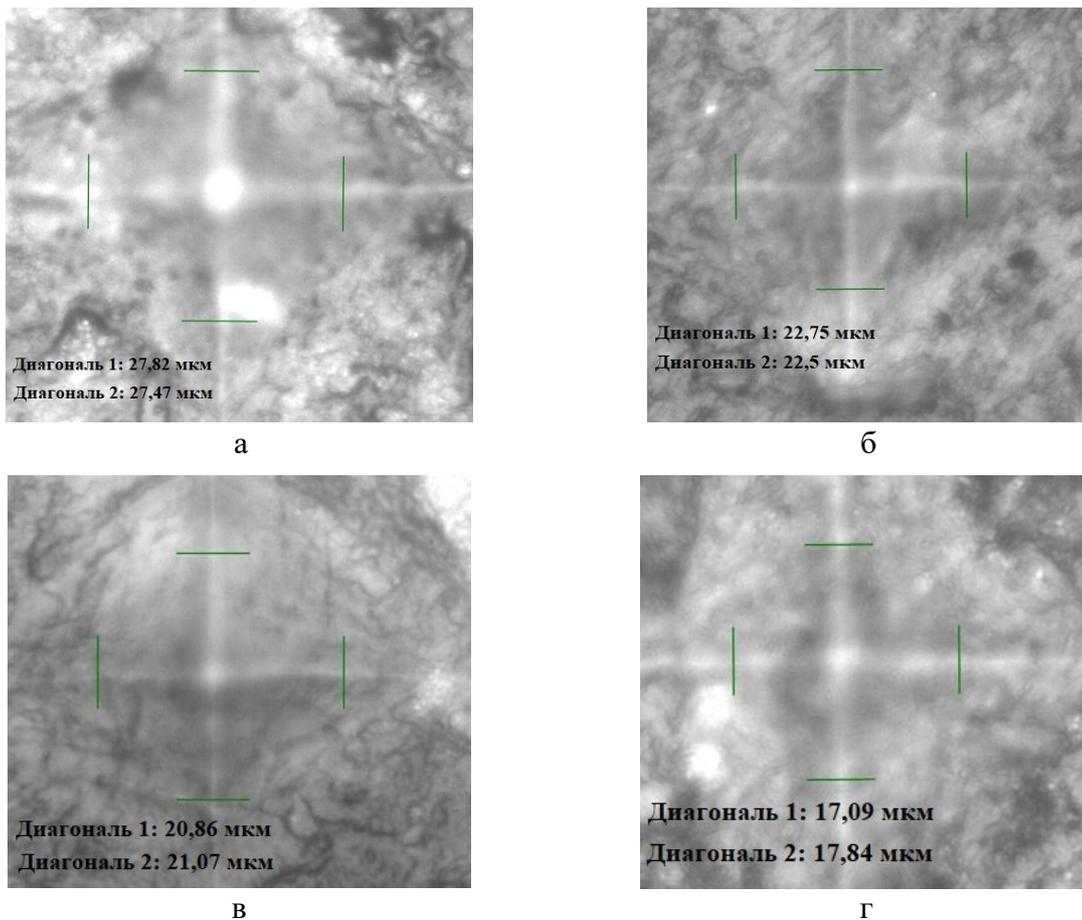


Рис. 3. Следы от индентора на композиционных образцах: а – образец 3; б – образец 6; в – образец 9; г – образец 12

Fig. 3. Traces of indenter on composite samples: а – sample 3; б – sample 6; в – sample 9; г – sample 12

Следы от индентора на композиционных образцах чётко различимы. Далее в программе прибора автоматически высчитывалось среднее значение микротвёрдости всех исследованных композиционных образцов. На рисунке 4 представлен график зависимости величины микротвёрдо-

сти композиционных образцов от различного процентного содержания в них наполнителей, построенный по полученным экспериментальным данным. Начальной точкой на графике является значение микротвёрдости акриловой смолы без включений.

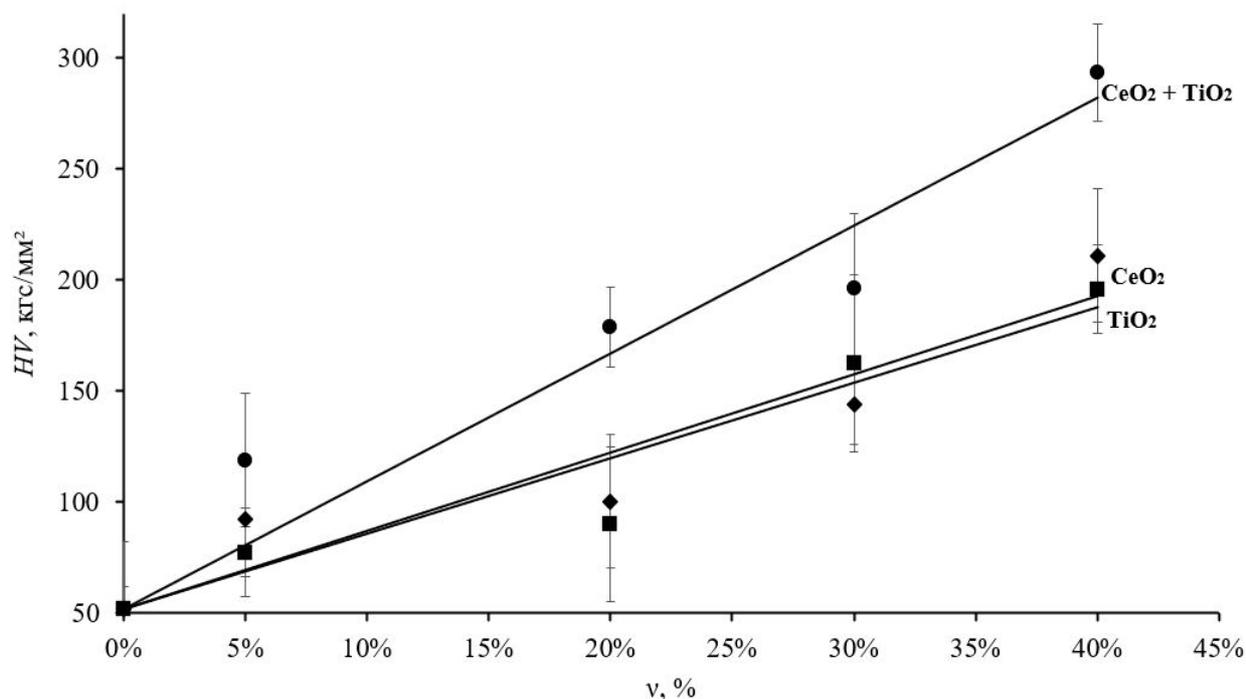


Рис. 4. Зависимость величины микротвёрдости композиционных образцов от различного процентного содержания в них наполнителей частиц диоксида церия и наночастиц диоксида титана, сплошные линии – аппроксимирующие прямые

Fig. 4. Dependence of the microhardness value of composite samples on different percentage contents of fillers in them - cerium dioxide particles and titanium dioxide nanoparticles, solid lines - approximating straight lines

Из графика (см. рис. 4) видно, что при добавлении частиц диоксида церия и наночастиц диоксида титана в акриловую смолу значения микротвёрдости композиционных материалов возрастают. Также на графике наблюдается более интенсивный рост микротвёрдости композиционных материалов при суммарном добавлении в них двух наполнителей по сравнению с материалами, в которые был включен один наполнитель. Таким образом, значения микротвёрдости композиционных материалов увеличиваются от роста

процентного содержания в них наполнителей.

Представленные результаты наглядно демонстрируют, что добавление в акриловую смолу частиц диоксида церия и наночастиц диоксида титана увеличивают значения их микротвёрдости. Увеличение микротвёрдости композиционных материалов предположительно обусловлено межмолекулярным взаимодействием смеси частиц диоксида церия, наночастиц диоксида титана и акриловой смолы между собой в процессе её плавления в

гидравлическом прессе под действием температуры. Полученные результаты могут иметь большое значение для разработки новых перспективных композиционных материалов.

Выводы

1. Разработана методика получения композиционных материалов с включением частиц диоксида церия и наночастиц диоксида титана с помощью горячего прессования.

2. Методом атомно-силовой микроскопии выявлено присутствие наночастиц и их агломератов в порошке диоксида титана.

3. С помощью рентгеноструктурного анализа определено наличие наполнителей в композиционных образцах и отсутствия в них примесей других соединений.

4. Значения микротвёрдости композиционных материалов увеличиваются от роста процентного содержания в них наполнителей.

Список литературы

1. Ladha K., Verma M. 19th century denture base materials revisited // *Journal of the History of Dentistry*. 2011. Vol. 59, no. 1. P. 1.
2. Mechanical properties of denture base resin cross-linked with methacrylated dendrimer / T. Kawaguchi, L.V. Lassila, P.K. Vallittu, Y. Takahashi // *Dental materials*. 2011. Vol. 27, no. 8. P. 755–761. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.03.015>.
3. Altaie S.F. Tribological, microhardness and color stability properties of a heat-cured acrylic resin denture base after reinforcement with different types of nanofiller particles // *Dental and Medical Problems*. 2023. Vol. 60, no. 2. P. 295–302. <https://doi.org/10.17219/dmp/137611>.
4. Raszewski Z. Acrylic resins in the CAD/CAM technology: A systematic literature review // *Dental and Medical Problems*. 2020. Vol. 57, no. 4. P. 449–454. <https://doi.org/10.17219/dmp/124697>.
5. Investigating the mechanical properties of ZrO₂-impregnated PMMA nanocomposite for denture-based applications / S. Zidan, N. Silikas, A. Alhotan, J. Haider, J. Yates // *Materials*. 2019. Vol. 12, no. 8. P. 1344. <https://doi.org/10.3390/ma12081344>.
6. Polymerization shrinkage, hygroscopic expansion, elastic modulus and degree of conversion of different composites for dental application / A.L.S. Borges, A.M.D.O. Dal Piva, S.E. Moecke, R.C. de Moraes, J.P.M. Tribst // *Journal of Composites Science*. 2021. Vol. 5, no. 12. P. 322. <https://doi.org/10.3390/jcs5120322>.
7. Influence of addition of zirconia on PMMA: A systematic review / R. de Souza Leao, S.L.D. de Moraes, J.M. de Luna Gomes, C.A.A. Lemos, B.G. da Silva Casado, B.C. do Egito Vasconcelos [et al.] // *Materials Science and Engineering: C*. 2020. Vol. 106. P. 110292. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110292>.
8. Mitra S.B., Wu D., Holmes B.N. An application of nanotechnology in advanced dental materials // *The Journal of the American Dental Association*. 2003. Vol. 134, no. 10. P. 1382–1390. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2003.0054>.
9. Impact of thermal properties of veneering ceramics on the fracture load of layered Ce-TZP/A nanocomposite frameworks / J. Fischer, B. Stawarczyk, A. Trottmann, C.H. Hammerle // *Dental Materials*. 2009. Vol. 25, no. 3. P. 326–330. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.08.001>.
10. Wang Q., Perez J.M., Webster T.J. Inhibited growth of *Pseudomonas aeruginosa* by dextran- and polyacrylic acid-coated ceria nanoparticles // *International journal of nanomedicine*. 2013. P. 3395–3399. <https://doi.org/10.2147/IJN.S50292>.
11. Dahl M., Liu Y., Yin Y. Composite titanium dioxide nanomaterials // *Chemical reviews*. 2014. Vol. 114, no. 19. P. 9853–9889. <https://doi.org/10.1021/cr400634p>.

12. Reijnders L. The release of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles from nanocomposites // *Polymer degradation and stability*. 2009. Vol. 94, no. 5. P. 873–876. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.02.005>.

13. Chatterjee A. Effect of nanoTiO₂ addition on poly (methyl methacrylate): an exciting nanocomposite // *Journal of applied polymer science*. 2010. Vol. 116, no. 6. P. 3396–3407. <https://doi.org/10.1002/app.31883>.

14. Abass B.A., Hunain M.B., Khudair J.M. Effects of Titanium dioxide nanoparticles on the mechanical strength of epoxy hybrid composite materials reinforced with unidirectional Carbon and glass fibers // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1094, no. 1. P. 012159. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1094/1/012159>.

15. Tekin D., Birhan D., Kiziltas H. Thermal, photocatalytic, and antibacterial properties of calcinated nano-TiO₂/polymer composites // *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 251. P. 123067. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123067>.

16. Barik M., Das D., Satapathy P.K., Mohapatra P. Graphene supported ceria-titania mixed oxide composite-An effective photo catalyst for methylene blue (MB) dye degradation // *Environmental Engineering Research*. 2023. Vol. 28, no. 6. P. 220586. <https://doi.org/10.4491/eer.2022.586>.

17. Synthesis, characterization, thermal properties, conductivity and sensor application study of polyaniline/cerium-doped titanium dioxide nanocomposites / T. Sampreeth, M.A. Al-Maghrabi, B.K. Bahuleyan, M.T. Ramesan // *Journal of materials science*. 2018. Vol. 53, no. 1. P. 591–603. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1505-8>.

18. Physical analysis of an acrylic resin modified by metal and ceramic nanoparticles / L. Machado-Santos, K. Baroudi, N. Silikas, J.P.M. Mendes Tribst, M.A. Coelho Sinhoreti, W. Brandt [et al.] // *Dental and Medical Problems*. 2023. Vol. 60, no. 4. P. 657–664. <https://doi.org/10.17219/dmp/171844>.

References

1. Ladha K., Verma M. 19th century denture base materials revisited. *Journal of the History of Dentistry*. 2011;59(1):1.

2. Kawaguchi T., Lassila L.V., Vallittu P.K., Takahashi Y. Mechanical properties of denture base resin cross-linked with methacrylated dendrimer. *Dental materials*. 2011;27(8):755–761. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.03.015>.

3. Altaie S.F. Tribological, microhardness and color stability properties of a heat-cured acrylic resin denture base after reinforcement with different types of nanofiller particles. *Dental and Medical Problems*. 2023;60(2):295–302. <https://doi.org/10.17219/dmp/137611>.

4. Raszewski Z. Acrylic resins in the CAD/CAM technology: A systematic literature review. *Dental and Medical Problems*. 2020;57(4):449–454. <https://doi.org/10.17219/dmp/124697>.

5. Zidan S., Silikas N., Alhotan A., Haider J., Yates J. Investigating the mechanical properties of ZrO₂-impregnated PMMA nanocomposite for denture-based applications. *Materials*. 2019;12(8):1344. <https://doi.org/10.3390/ma12081344>.

6. Borges A.L.S., Dal Piva A.M.D.O., Moecke S.E., de Moraes R.C., Tribst J.P.M. Polymerization shrinkage, hygroscopic expansion, elastic modulus and degree of conversion of different composites for dental application. *Journal of Composites Science*. 2021;5(12):322. <https://doi.org/10.3390/jcs5120322>.

7. Souza Leao R. de, Moraes S.L.D. de, Luna Gomes J.M. de, Lemos C.A.A., Silva Casado B.G. da, Egito B.C. do Vasconcelos, et al. Influence of addition of zirconia on PMMA: A systematic review. *Materials Science and Engineering: C*. 2020;106:110292. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.110292>.

8. Mitra S.B., Wu D., Holmes B.N. An application of nanotechnology in advanced dental materials. *The Journal of the American Dental Association*. 2003;134(10):1382–1390. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2003.0054>.
9. Fischer J., Stawarczyk B., Trottmann A., Hammerle C.H. Impact of thermal properties of veneering ceramics on the fracture load of layered Ce-TZP/A nanocomposite frameworks. *Dental Materials*. 2009;25(3):326–330. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.08.001>.
10. Wang Q., Perez J.M., Webster T.J. Inhibited growth of *Pseudomonas aeruginosa* by dextran- and polyacrylic acid-coated ceria nanoparticles. *International journal of nanomedicine*. 2013;8:3395–3399. <https://doi.org/10.2147/IJN.S50292>.
11. Dahl M., Liu Y., Yin Y. Composite titanium dioxide nanomaterials. *Chemical reviews*. 2014;114(19):9853–9889. <https://doi.org/10.1021/cr400634p>.
12. Reijnders L. The release of TiO₂ and SiO₂ nanoparticles from nanocomposites. *Polymer degradation and stability*. 2009;94(5):873–876. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.02.005>.
13. Chatterjee A. Effect of nanoTiO₂ addition on poly (methyl methacrylate): an exciting nanocomposite. *Journal of applied polymer science*. 2010;116(6):3396–3407. <https://doi.org/10.1002/app.31883>.
14. Abass B.A., Hunain M.B., Khudair J.M. Effects of Titanium Dioxide nanoparticles on the mechanical strength of epoxy hybrid composite materials reinforced with unidirectional Carbon and glass fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1094(1):012159. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1094/1/012159>.
15. Tekin D., Birhan D., Kiziltas H. Thermal, photocatalytic, and antibacterial properties of calcinated nano-TiO₂/polymer composites. *Materials Chemistry and Physics*. 2020;251:123067. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123067>.
16. Barik M., Das D., Satapathy P.K., Mohapatra P. Graphene supported ceria-titania mixed oxide composite-An effective photo catalyst for methylene blue (MB) dye degradation. *Environmental Engineering Research*. 2023;28(6):220-586. <https://doi.org/10.4491/eer.2022.586>.
17. Sampreeth T., Al-Maghrabi M.A., Bahuleyan B.K., Ramesan M.T. Synthesis, characterization, thermal properties, conductivity and sensor application study of polyaniline/cerium-doped titanium dioxide nanocomposites. *Journal of materials science*. 2018;53(1):591–603. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1505-8>.
18. Machado-Santos L., Baroudi K., Silikas N., J.P.M. Tribst Mendes, M. Sinhoreti, W. Brandt, et al. Physical analysis of an acrylic resin modified by metal and ceramic nanoparticles. *Dental and Medical Problems*. 2023;60(4):657–664. <https://doi.org/10.17219/dmp/171844>.

Информация об авторах / Information about the Authors

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

Мамонтов Владимир Александрович, преподаватель кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, 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 Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation,
e-mail: vladimir-mamontov2013@yandex.ru,
ORCID: 0000-0003-0592-3851

Пауков Владимир Митрофанович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: paukov.vm@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5963-9904

Vladimir M. Paukov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: paukov.vm@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-5963-9904

Беляев Сергей Александрович, студент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: Ser_bel2200@mail.ru

Sergey A. Belyaev, Student of the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: Ser_bel2200@mail.ru

Пугачевский Максим Александрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, директор Регионального центра нанотехнологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: pmaximal@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5004-0823

Maksim A. Pugachevskii, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor at the Department of Nanotechnology, Microelectronics and Engineering Physics, Director of the Regional Center of Nanotechnology, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: pmaximal@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5004-0823

Жакин Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149

Anatoly I. Zhakin, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149

Сизов Александр Семёнович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем и технологий, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: sizov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8110-9929

Sizov Alexander Semenovich, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department Engineering Program, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: sizov@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8110-9929