

# Разработка отечественных CAD/CAM заготовок для стоматологии

О.О. Янушевич<sup>1</sup>, Н.И. Крихели<sup>1</sup>, И.В. Клизов<sup>1</sup>, А.Т. Сампиев<sup>1</sup>, О.В. Крамар<sup>1</sup>, П.Ю. Перетягин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет» «СТАНКИН»

## РЕЗЮМЕ

Оксид циркония ( $ZrO_2$ ) занимает значимое место в производстве инженерных материалов благодаря своей выдающейся физико-химической стабильности. Успехи в стабилизации циркониевых материалов открыли новые горизонты их применения, начиная от медицины и заканчивая сложными аэрокосмическими технологиями. Особое внимание уделяется его роли в технологиях CAD/CAM в стоматологии, которые обеспечивают высокую точность и сокращают сроки лечения. Целью данного исследования является разработка и оптимизация методик получения и консолидации наноструктурированных порошков на основе оксида циркония для применения в CAD/CAM. Материалы и методы: Для исследования использовался качественный оксид циркония в виде стабилизированного порошка 3Y-TZP, содержащий 3 мол.% оксида иттрия ( $Y_2O_3$ ), обеспечивающего стабилизацию в тетрагональной фазе. Кроме того, для улучшения процессов агломерации и синтеринга были использованы различные добавки, такие как полиэтиленгликоль (PEG) и поливиниловый спирт (PVA), которые служат в качестве связующих и пластификаторов. Безусловно, технологии CAD/CAM занимают одно из первых мест в современной стоматологии. Исследование и оптимизация процесса производства отечественных CAD/CAM-заготовок из диоксида циркония помогут усовершенствовать производственные технологии и улучшить их характеристики. Основное внимание в проведенном исследовании было уделено улучшению механических свойств, таких как плотность, твердость и стойкость к образованию трещин, которые являются ключевыми для функциональной надежности материала. Разработка отечественных CAD/CAM-заготовок, по своим характеристикам не уступающих зарубежным аналогам, позволит повысить качество стоматологических услуг и будет способствовать импортозамещению в данной области. Исследование свойств и их последующая оптимизация подчеркивают значительный потенциал данной сферы, способствуя дальнейшим научным исследованиям и технологическим новациям, создавая фундамент для будущих технологических прорывов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** CAD/CAM, оксид циркония, наноструктурированный порошок, отечественные заготовки, импортозамещение.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Development of domestic CAD/CAM blanks for dentistry

O.O. Yanushevich<sup>1</sup>, N.I. Krikheli<sup>1</sup>, I.V. Klizhov<sup>1</sup>, A.T. Sampiev<sup>1</sup>, O.V. Kramar<sup>1</sup>, P.Yu. Peretyagin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Russian University of Medicine of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

## SUMMARY

Zirconium oxide ( $ZrO_2$ ) occupies a significant place in the production of engineering materials due to its outstanding physicochemical stability. Advances in the stabilization of zirconium materials have opened up new horizons for their application, ranging from medicine to sophisticated aerospace technologies. Particular attention is paid to its role in CAD/CAM technologies in dentistry, which provide high precision and reduce treatment times. The aim of this study is to develop and optimize methods for the production and consolidation of nanostructured zirconium oxide powders for CAD/CAM applications. Materials and methods: High-quality zirconium oxide in the form of stabilized 3Y-TZP powder containing 3 mol.% yttrium oxide ( $Y_2O_3$ ), which provides stabilization in the tetragonal phase, was used for the study. In addition, various additives such as polyethylene glycol (PEG) and polyvinyl alcohol (PVA), which serve as binders and plasticizers, were used to improve the agglomeration and sintering processes. Of course, CAD/CAM technologies occupy one of the first places in modern dentistry. Research and optimization of the production process of domestic CAD/CAM blanks made of zirconium dioxide will help to improve production technologies and improve their characteristics. The main focus of the study was on improving mechanical properties, such as density, hardness and resistance to cracking, which are key to the functional reliability of the material. The development of domestic CAD/CAM blanks, whose characteristics are not inferior to foreign analogues, will improve the quality of dental services and will contribute to import substitution in this area. The study of properties and their subsequent optimization emphasize the significant potential of this area, contributing to further scientific research and technological innovations, creating a foundation for future technological breakthroughs.

**KEYWORDS:** CAD/CAM, zirconium oxide, nanostructured powder, domestic blanks, import substitution.

**CONFLICT OF INTEREST.** The authors declare that they have no conflicts of interest.

## Введение

Оксид циркония ( $ZrO_2$ ) издавна занимает важное место в производстве инженерных материалов благодаря своим впечатляющим физико-химическим характеристикам. Открытие и внедрение стабилизированных циркониевых материалов стало революционным шагом, позволившим расширить область их применения от медицины до высокотехнологичных элементов в аэрокосмической

области. На сегодняшний день оксид циркония признан одним из самых универсальных и потенциально значимых материалов будущего, особенно в контексте технологий CAD/CAM для стоматологии. Технология CAD/CAM позволяет создавать стоматологические конструкции сложной формы и дизайна, что позволяет добиться максимальной точности и минимизировать сроки лечения [1].

## История и развитие технологии

Первоначально оксид циркония использовали преимущественно в качестве компонента для термостойких покрытий и электроники. Однако с развитием технологий добавление стабилизаторов, таких как  $Y_2O_3$ , привело к созданию материалов, обладающих существенно более высокими показателями механической прочности и трещиностойкости.

В последнее десятилетие CAD/CAM технологии стали мощным инструментом в производстве сложных конструкций из оксида циркония, обеспечив не только высокую точность получаемых изделий, но и существенно сократив время их изготовления. Применение таких технологий позволяет получать стоматологические конструкции высокого качества в минимальные сроки.

Стоматологические конструкции изготавливаются посредством многокоординатного фрезерования из подпеченных керамических заготовок (green body), обладающих необходимым цветом. Механическая обработка осуществляется с использованием методов числового программного управления (ЧПУ) и 3D моделирования. При использовании CAD/CAM-технологий применяются трехмерные модели зубного ряда пациента, которые получают при помощи сканирования. Полученная таким способом заготовка стоматологической конструкции проходит стадию спекания до высокой плотности [2–6].

## Технологическая важность

Внедрение CAD/CAM технологий в производство заготовок из оксида циркония повысило их конкурентоспособность. Благодаря исключительной биосовместимости и эстетической привлекательности, циркониевые стоматологические конструкции становятся все более популярными при ортопедическом лечении. Такой интерес связан с потребностью в материалах, обеспечивающих не только требуемые физико-механические параметры, но также легкость обработки и возможность миниатюризации компонентов без потери их функциональных качеств. Оптимизация процесса производства, включая этапы подготовки порошков и их последующей консолидации, представляется ключом к улучшению свойств и снижению себестоимости конечных изделий.

## Цель и задачи исследования

Основной целью данного исследования является разработка и оптимизация методик получения и консолидации наноструктурированных порошков на основе оксида циркония для применения в CAD/CAM. Одной из задач является изучение влияния параметров распылительной сушки на характеристики получаемых порошков. В частности, исследуются такие свойства, как размер и форма частиц, пористость, фазовый и элементный состав. Другой важной задачей выступает анализ различных методов спекания порошков, таких как свободное и искровое плазменное спекание (ИПС), с целью достижения идеальных показателей плотности, механической прочности и трещиностойкости. Обсуждается также влияние предварительной обработки порошков на общий технологический процесс и конечные свойства полученных материалов.

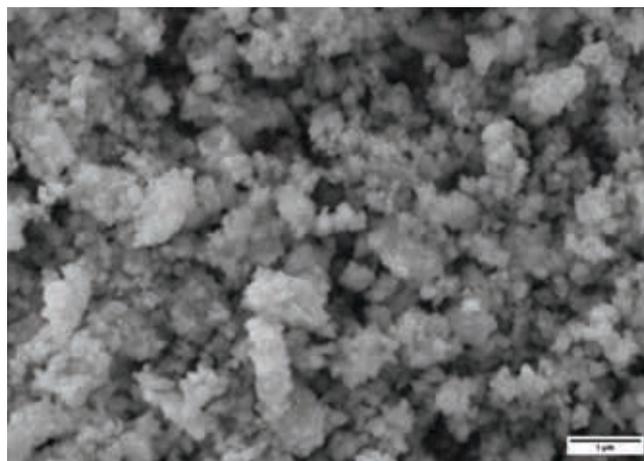


Рисунок 1. Исходный порошок диоксида циркония

## Актуальность исследования

Современные вызовы в области материаловедения и инженерии диктуют необходимость в разработке новых подходов к производству высокоэффективных материалов. Исследование новых методик и технологий подготовки оксида циркония и его композитных материалов способствуют адаптации производства к рыночным требованиям по качеству и эффективности. Таким образом, исследования, на которых сосредоточена данная работа, имеют не только академическую значимость, но и предоставляют инновационные промышленные решения.

## Материалы и методы

### 1. Исходные материалы

Для исследования использовался качественный оксид циркония в виде стабилизированного порошка 3Y-TZP, содержащий 3 мол.% оксида иттрия ( $Y_2O_3$ ), обеспечивающего стабилизацию в тетрагональной фазе. Выбор этого материала обусловлен его превосходной трещиностойкостью и механическими свойствами.

Кроме того, для улучшения процессов агломерации и синтеринга были использованы различные добавки, такие как полиэтиленгликоль (PEG) и поливиниловый спирт (PVA), которые служат в качестве связующих и пластификаторов.

### 2. Порошковая технология и грануляция

Изначальной задачей было достижение нужных характеристик гранулята с применением распылительной сушки. Процесс начинался с предварительного диспергирования порошка оксида циркония в водной среде с добавлением диспергаторов, предотвращающих агломерацию частиц (рис. 1).

Для этого применялся высокоэнергетический ультразвуковой диспергатор, который позволял получить однородную суспензию. Процесс распылительной сушки проводился с использованием Buchi Mini Spray Dryer B-290 (рис. 1), который обеспечивал гибкость в управлении параметрами процесса. Основные контролируемые параметры:

- Температура входного воздуха: варьировалась от 150 до 200°C, что позволяет оптимально удалять влагу, не вызывая термического разложения добавок.

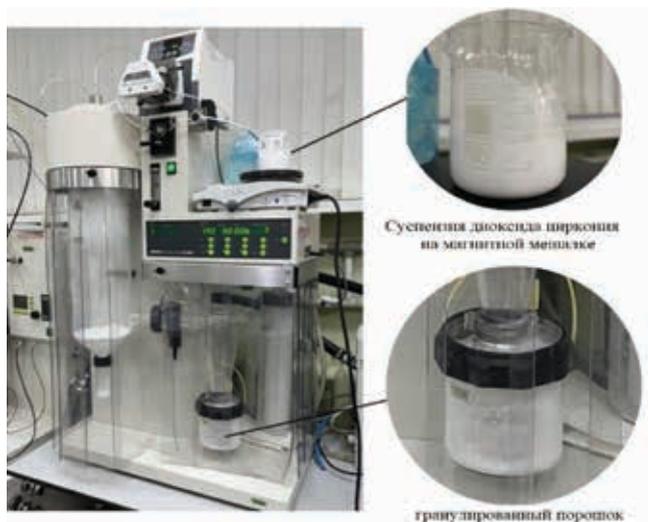


Рисунок 2. Получение гранул диоксида циркония

- Скорость подачи суспензии: определялась опытным путем для достижения сферической формы гранул; предпочитались уровни между 4 и 7 мл/мин.
- Скорость воздушного потока: регулировалась в пределах 350–500 л/ч для обеспечения стабильности процесса.

### 3. Характеризация порошков

Полученные порошки подвергались ряду тестов для определения их свойств:

- Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ): использовалась для оценки морфологии и размера гранул.
- Рентгеновская дифракция (РД): применялась для определения фазового состава и оценки уровня кристалличности.
- Микрофлуоресцентный анализ (МФА): проводился для количественного анализа элементного состава, обеспечивая контроль уровня содержания стабилизаторов.

### 4. Методы синтеринга

Порошки подвергались различным методам спекания для создания монолитных образцов, включая методы свободного и искрового плазменного спекания.

**Свободное спекание:** Спекание образцов проводилось при температурах от 1300 до 1600 °С с шагом 50 °С. Дополнительно были спечены еще 2 образца при 1600 °С (2 шт.) и 1650 °С (2 шт.) для определения максимального значения относительной плотности. Теоретическая плотность была принята 6,0 г/см<sup>3</sup>. Таблица 1 показывает результаты двух измерений относительной плотности. Продолжительность спекания варьировалась от 2 до 5 часов, что позволяло достигать плотности выше 95%.

**Искровое плазменное спекание (ИПС):** это передовая техника, которая позволяет быстро проводить спекание при значительно более низких температурах за счет импульсного собирательного действия электродов [8]. Применяя ИПС, удавалось достигать почти полной плотности и минимизировать рост зерен, что важно для сохранения механических свойств.

Таблица 1  
Относительная плотность образцов после ИПС

№	Температура спекания, °С	Относительная плотность, %		
		первое измерение	второе измерение	среднее значение
1	1300	96,884	96,806	96,845
2	1350	97,651	97,682	97,667
3	1400	98,152	98,254	98,203
4	1450	98,987	98,818	98,903
5	1500	99,359	99,362	99,361
6	1550	99,996	99,836	99,916
7	1600	99,995	99,912	99,954
8	1650	99,899	99,996	99,948

### 5. Тестирование механических свойств

После консолидации образцы испытывались на механические свойства:

- плотность: определялась с помощью метода погружения с использованием ареометра Архимеда.
- твердость: измерялась с помощью метода Vickers, который позволяет оценить сопротивление материала образованию вмятин.
- трещиностойкость: определялась с помощью крэк-выпила и последующего анализа образовавшихся трещин.
- микроструктурный анализ: выполнялся с использованием микроскопии высокого разрешения для выявления изменения структуры при разных условиях спекания.

Проведенный анализ позволил выявить оптимальные параметры для промышленного применения и дальнейших исследований, расширяя возможности использования оксида циркония в различных технологиях.

### Результаты и обсуждение

#### 1. Морфологические характеристики

Проведенные исследования с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) продемонстрировали, что полученные после распылительной сушки гранулы имели преимущественно сферическую форму, что является оптимальным для равномерной плотности и минимизации дефектов при спекании. Средний размер гранул (D50) варьировался от 1,9 до 2,3 мкм в зависимости от параметров процесса, таких как температура и скорость подачи суспензии.

При температурах выше 180 °С наблюдалось уменьшение пористости, однако чрезмерное повышение температуры приводило к агломерации частиц, что негативно сказывалось на однородности.

Достижение сферичности гранул обеспечивало равномерное распределение материала при укладке и спекании, способствовала улучшению конечной механической прочности.

#### 2. Фазовый состав и элементный анализ

Рентгеновская дифракция (РД) подтвердила, что порошки были преимущественно в тетрагональной фазе, что является желательной для достижения высокой трещиностойкости. Анализ элементного состава с использованием микрофлуоресцентного анализа выявил, что концентрация стабилизатора (иттрий) оставалась стабильной, не наблюдалось существенного вымывания при проводимых этапах обработки.

### 3. Методы спекания и консолидация

Эксперименты с методами свободного и искрового плазменного спекания (ИПС) позволили выявить их преимущества и недостатки.

Свободное спекание: метод продемонстрировал хорошие результаты по достижению плотности свыше 95% при температуре около 1450 °С. Однако процесс требовал значительных временных затрат и контроля температуры для предотвращения роста зерен.

Искровое плазменное спекание показало значительно более высокую эффективность, позволяя достичь почти полной плотности за меньший промежуток времени. Метод характеризовался минимальным ростом зерна и сохранением микроструктуры, что в свою очередь способствовало улучшению механических характеристик.

### 4. Механические свойства

Механические испытания образцов, прошедших через различные процессы спекания, показали отличия в результатах:

- Твердость. Средняя твердость образцов, полученных методом ИПС, составила 13,7 ГПа, что значительно выше по сравнению с образцами после свободного спекания, где среднее значение составляло около 12,5 ГПа.
- Трещиностойкость. Благодаря контролю за ростом зерен, ИПС обеспечивал трещиностойкость на уровне 6,9 МПа√м, что выше по сравнению с традиционными методами.

Особенности микроструктуры: анализ с использованием микроскопии высокого разрешения показал, что при использовании ИПС наблюдалось более равномерное распределение зерен и меньшая степень агломерации, что минимизировало появление возможных трещин и дефектов.

Достигнутые результаты подчеркивают важность выбора оптимальных параметров на каждом этапе производства при работе с материалами на основе оксида циркония.

Полученные результаты доказывают потенциал использования технологий ИПС в массовом производстве для достижения высокой механической стойкости и точности.

### Заключение

Несомненно, CAD/CAM-технологии занимают важное место в современной стоматологии. Изучение и оптимизация процесса создания отечественных CAD/CAM-заготовок на основе диоксида циркония, позволят усовер-

шенствовать технологию изготовления и повысить их свойства. Основные акценты в проведенном исследовании были сосредоточены на улучшении механических свойств, таких как плотность, твердость и трещиностойкость, которые являются критическими для функциональной надежности материала. Отечественные CAD/CAM-заготовки, не уступающие по своим характеристикам и свойствам зарубежным аналогам, позволят повысить уровень оказываемой стоматологической помощи и будут способствовать импортозамещению в стоматологии. Исследование свойств и их последующая оптимизация подчеркивают высокий потенциал данной области, стимулируя дальнейшие научные исследования и технологические инновации, создавая основу для будущих технологических достижений [6].

### Список литературы / References

1. *Materials and Methods for All-Ceramic Dental Restorations Using Computer-Aided Design (CAD) and Computer-Aided Manufacturing (CAM) Technologies.* – A Brief Review. N.W. Solis Pinargote, A. Smirnov, O. Yanushevich, N. Kriheli, P. Peretyagin, S.S. Savilkin, S. Grigoriev // *Technologies. – A Brief ReviewDent J (Basel)*. 2024
2. Микрорепротезирование в стоматологии. Учебник. Абакаров С.И., Сорокин Д.В., Абакарова Д.С.; Под ред. С.И. Абакарова. 2019 г. // *Геотар-Медиа. Microprosthetics in dentistry. Textbook. Abakarov S.I., Sorokin D.V., Abakarova D.S.; Ed. S.I. Abakarova. 2019 // Geotar-Media.*
3. Цифровое моделирование бюгельных протезов / С.С. Наумович, А.Н. Разоренов // *БГМУ в авангарде медицинской науки и практики: сб. науч. тр. / Беларус. гос. мед. ун-т; под ред. А.В. Сикорского, О.К. Дорониной.* – Вып. 6. – Минск: РНМБ, 2016. – С. 66–67.
4. *Digital modeling of clasp prostheses / S.S. Naumovich, A.N. Razorenov // BSMU at the forefront of medical science and practice: collection. scientific tr. / Belarusian. state honey. University; edited by A.V. Sikorsky, O.K. Doronina.* – Vol. 6. – Minsk: RNMB, 2016. – P. 66–67.
4. CAD/CAM-технологии и их место в современной стоматологии. Янушевич О.О., Крихели Н.И., Перетягин П.Ю., Крамар О.В., Перетягин Н.Ю., Клизов И.В., Ундритцова Н.Г. // *Российская стоматология. 2023;16(4):3–7.*
5. CAD/CAM technologies and their place in modern dentistry. Yanushevich O.O., Kriheli N.I., Peretyagin P.Yu., Kramar O.V., Peretyagin N.Yu., Klizhov I.V., Undritsova N.G. // *Russian Dentistry. 2023;16(4):3–7.*
7. Актуальные проблемы и перспективы развития стоматологии в условиях Севера. Аналитический обзор современного состояния использования цифровых технологий в ортопедической стоматологии в Российской Федерации. Галонский В.Г., Сурдо Э.С., Чернов В.Н. // *Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова (Якутск)*, 2023.
8. *Current problems and prospects for the development of dentistry in the North. Analytical review of the current state of the use of digital technologies in orthopedic dentistry in the Russian Federation. Galonsky V.G., Surdo E.S., Chernov V.N. // North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosova (Yakutsk)*, 2023.
8. Возможности технологии искрового плазменного спекания для синтеза функциональных керамик практического назначения / Папынов Е.К., Шичалин О.О., Тананаев И.Г., Авраменко В.А., Сергиенко В.И. // *Труды Кольского научного центра РАН*, 2018.
8. *Possibilities of spark plasma sintering technology for the synthesis of functional ceramics for practical purposes/ Papynov E.K., Shichalin O.O., Tananaev I.G., Avramenko V.A., Sergienko V.I. // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018.

Статья поступила / Received 13.11.2024  
Получена после рецензирования / Revised 23.11.2024  
Принята в печать / Accepted 23.11.2024

#### Информация об авторах

**Янушевич Олег Олегович**<sup>1</sup>, д.м.н., профессор, ректор, заведующий кафедрой пропедевтики терапевтической стоматологии  
E-mail: olegyanushevich@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0059-4980>. eLibrary SPIN: 1452-1387

**Крихели Нателла Ильинична**<sup>1</sup>, д.м.н., профессор, проректор, заведующая кафедрой клинической стоматологии  
E-mail: krikheli\_msmsu@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8035-0638>. eLibrary SPIN: 5807-2718

**Клизов Иракий Важаевич**<sup>1</sup>, заместитель начальника цифрового развития и информационных технологий, ассистент кафедры клинической стоматологии  
E-mail: freeirenicus@gmail.com

**Сампиев Ахмед Таблиханович**<sup>1</sup>, к.м.н., ассистент кафедры клинической стоматологии  
eLibrary SPIN: 5075-7176.

**Крамар Ольга Викторовна**<sup>1</sup>, начальник управления науки, ассистент кафедры клинической стоматологии  
E-mail: dr.ovkramar@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0325-587X>. eLibrary SPIN: 1171-7192

**Перетягин Павел Юрьевич**<sup>1,2</sup> к.т.н., ведущий сотрудник лаборатории искрового плазменного спекания, заведующий лабораторией новых технологий и медицинских материалов  
E-mail: peretyagin.mstu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9053-496X>. eLibrary SPIN: 6284-8065

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет» «СТАНКИН»

#### Контактная информация:

Крамар Ольга Викторовна. E-mail: dr.ovkramar@gmail.com

**Для цитирования:** Янушевич О.О., Крихели Н.И., Клизов И.В., Сампиев А.Т., Крамар О.В., Перетягин П.Ю. Разработка отечественных CAD/CAM заготовок для стоматологии // Медицинский алфавит. 2024;(28):21–25. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-28-21-25>

#### Author information

**Yanushevich Oleg O.**<sup>1</sup>, DM Sci, prof., rector, head of the Department of Propaedeutics of Therapeutic Dentistry  
E-mail: olegyanushevich@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0059-4980>. eLibrary SPIN: 1452-1387

**Krikheli Natella I.**<sup>1</sup>, DM Sci, prof., vice-rector, head of the Department of Clinical Dentistry  
E-mail: krikheli\_msmsu@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8035-0638>. eLibrary SPIN: 5807-2718

**Klizhov Irakliy V.**<sup>1</sup>, Deputy Head of Digital Development and Information Technologies, Assistant Professor of the Department of Clinical Dentistry  
E-mail: freeirenicus@gmail.com.

**Sampiev Akhmed T.**<sup>1</sup>, PhD, Assistant Professor of the Department of Clinical Dentistry  
eLibrary SPIN: 5075-7176.

**Kramar Olga V.**<sup>1</sup>, Head of the Department of Science, Assistant of the Department of Clinical Dentistry  
E-mail: dr.ovkramar@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0325-587X>. eLibrary SPIN: 1171-7192

**Peretyagin Pavel Yu.**<sup>1,2</sup>, CT Sci, associate professor of the department "Highly Effective Processing Technologies", head of the Laboratory of New Technologies and Medical Materials

E-mail: peretyagin.mstu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9053-496X>. eLibrary SPIN: 6284-8065

<sup>1</sup> Russian University of Medicine of the Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

#### Contact information

Kramar Olga V. E-mail: dr.ovkramar@gmail.com

**For citation:** Yanushevich O.O., Krikheli N.I., Klizhov I.V., Sampiev A.T., Kramar O.V., Peretyagin P.Yu. Development of domestic CAD/CAM blanks for dentistry // Medical alphabet. 2024;(28):21–25. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2024-28-21-25>

