

# Оценка морфологии наполнителей современных стоматологических нанокомпозитных материалов

Н.И. Крихели<sup>1</sup>, П.Ю. Перетягин<sup>1,2</sup>, М.Н. Бычкова<sup>1</sup>, Е.Ю. Мендоса<sup>1</sup>, О.В. Руднева<sup>1</sup>, Н.Ю. Перетягин<sup>1,2</sup>, С.Р. Шехтман<sup>2</sup>, Е.В. Кузнецова<sup>1,2</sup>, А.Ю. Курмышева<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> ФГАУ ВО «МГТУ» СТАНКИН», Москва, Россия

## РЕЗЮМЕ

В ходе исследовательской работы была проведена оценка морфологических характеристик неорганического наполнителя пяти коммерческих и одного экспериментального стоматологических реставрационных композитных материалов, содержащих наноразмерные частицы, с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 LMH (Tescan, Брно, Чешская Республика). При проведении сканирующей электронной микроскопии было выявлено, что исследуемые образцы импортных пастообразных композитных материалов имели наполнители сходные по форме и размеру: преполяризованные конгломераты иррегулярной формы от 3 до 40 мкм, состоящие из наноразмерных сфер менее 200 нм, и отдельные сферические частицы размером до 200 нм. Преполяризованный наполнитель в низко модульном (текучем) импортном композите имеет меньший диаметр от 3 до 30 мкм и более правильную сферическую форму. Филлеры композитных материалов российского производства имели оскольчатую форму частиц, часть наполнителя составляли кластеры микронного размера от 5 до 30 мкм, которые были образованы наноразмерными сферическими частицами менее 100 нм. Экспериментальный композитный материал имел в своем составе микросферы с диапазоном размеров от 5 до 20 мкм, состоящие из наноразмерных частиц сферической формы до 450 нм. По морфологической структуре экспериментальный композит сопоставим с наполнителями современных импортных коммерческих стоматологических композитных материалов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** композиты стоматологические, сферический наполнитель, наноразмерный наполнитель, морфология наполнителя, диоксид кремния, оксид циркония.

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

## Evaluation of the morphology of fillers of modern dental nanocomposite materials

N.I. Krikheli<sup>1</sup>, P.Yu. Peretyagin<sup>1,2</sup>, M.N. Bychkova<sup>1</sup>, E.Yu. Mendoza<sup>1</sup>, O.V. Rudneva<sup>1</sup>, N.Yu. Peretyagin<sup>1,2</sup>, S.R. Shekhtman<sup>2</sup>, E.V. Kuznetsova<sup>1,2</sup>, A.Yu. Kurmysheva<sup>2</sup>

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

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

## SUMMARY

In the course of the research work, the morphological characteristics of the inorganic filler of five commercial and one experimental dental restorative composite materials containing nanosized particles were assessed using a Tescan Vega 3 LMH scanning electron microscope (Tescan, Brno, Czech Republic). Scanning electron microscopy revealed that the studied samples of imported paste-like composite materials contained fillers similar in shape and size: prepolarized conglomerates of irregular shapes ranging from 3 to 40 μm, consisting of nanoscale spheres less than 200 nm in size, and individual spherical particles up to 200 nm in size. The prepolarized filler in the low-modulus (flowable) imported composite had a smaller diameter of 3 to 30 μm and a more regular spherical shape. The fillers in the Russian-produced composite materials had fragmented particles, with some of the filler consisting of micron-sized clusters ranging from 5 to 30 μm, formed by nanoscale spherical particles less than 100 nm in size. The experimental composite material contained microspheres ranging in size from 5 to 20 μm, consisting of nanoscale spherical particles up to 450 nm in size. In terms of morphological structure, the experimental composite is comparable to fillers of modern imported commercial dental composite materials.

**KEYWORDS:** dental composites, spherical filler, nanosized filler, filler morphology, silicon dioxide, zirconium oxide.

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

## Актуальность

Появление в середине прошлого века стоматологических композитов стало одним из важнейших шагов развития реставрационной стоматологии. С течением времени, в первую очередь, благодаря появлению новых технологий синтеза наполнителей, они претерпели значительные усовершенствования и стали самыми популярными пломбирочными материалами для восстановления как передних, так и жевательных зубов, опередив амальгаму и цементы [1]. Композиты позволя-

ют восстановить не только целостность и утраченную функцию зубов, но и их эстетические характеристики [2]. Адгезивная фиксация к минерализованным тканям зубов с высокими показателями устойчивости интерфейса соединения реставрация – зуб во времени, умеренная стоимость по сравнению с керамическими реставрациями, возможность консервативного подхода к препарированию полостей, прекрасная оптическая интеграция составляют основные преимущества прямой композитной реставрации.

Высокая клиническая востребованность усовершенствованных композитов определяется расширением показаний к их применению (например, в детской стоматологии, у пациентов с гнатологической и ортодонтической патологией), необходимостью улучшения манипуляционных свойств, повышением их биосовместимости, конверсии мономеров при отверждении, включением биологически активных компонентов и др. Основой стоматологических композитных материалов является органическая полимерная матрица и неорганический наполнитель, подвергнутый обработке поверхностно-активными веществами (силанами). Наполнитель является ключевым компонентом, определяющим механические, эстетические и функциональные свойства реставрации. Неорганические частицы наполнителя в композитах модифицируют для улучшения их прочностных характеристик и уменьшения полимеризационной усадки [3].

В определении физико-механических параметров композитов, решающую роль играют такие характеристики наполнителя, как тип, размер, форма и равномерность распределения [4]. Частицы кварца и стекла в составе композитов, используемые в 1960-х годах, уменьшились с более чем 50 мкм до субмикронных размеров в современных материалах [5]. Эволюция неорганической фракции композитов активно продолжается благодаря наукоемким технологиям и инновационным компонентам, вводимым производителями в их состав. Современные композиты включают синтетические неорганические наполнители с оптимизированным размером для усиления рассеивания света, улучшения глубины полимеризации и соответствия оптическим параметрам твердых тканей зубов [6]. Благодаря применению нанотехнологий композитные материалы были значительно усовершенствованы и приобрели улучшенные механические свойства и эстетические характеристики [7]. Использование новейших систем наполнителей из наночастиц оказывает существенное влияние на повышение эффективности применения и клинической долговечности пломбировочных материалов. Наночастицы характеризуются сверхмалым размером и большой спецификой поверхности, что определяет ряд их уникальных свойств – высокие механические, химические, оптические характеристики [1].

Включение наночастиц в композиты делает их структуру уникальной и имеет решающее значение для повышения таких механических характеристик, как прочность на изгиб, прочность на растяжение, износостойкость, увеличение срока службы реставрации [8]. Наноразмерные наполнители, размер которых меньше длины волны видимого света, определяют дополнительные преимущества: так называемый «хамелеон-эффект» и высокую конверсию мономеров. Это связано с тем, что снижается преломление и рассеивание света, что может значительно увеличить глубину отверждения [9]. Включение небольшого количества (1–3% по массе) модифицированных нанопористых частиц также приводит к улучшению механических свойств композита. Для достижения равномерного распределения в матрице необходима модификация поверхности частиц силанами [10].

Перспективным направлением в разработке многофункциональных наполнителей наряду с использованием наночастиц, модифицированных силанами, также является включение в состав филлеров биологически активных компонентов, придающих материалу антимикробные и реминерализующие свойства [11]. Использование модифицированных наночастиц позволяет предположить, что уменьшение размеров частиц и увеличение объемного наполнения могут повысить твердость поверхности и устойчивость к механическим нагрузкам, а также улучшить сорбционные характеристики композитов.

В качестве неорганических частиц наполнителя почти во всех коммерческих стоматологических композитах традиционно используются диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  и боросиликатные стекла. Это наиболее широко используемые типы частиц, поскольку они обладают наибольшим сходством по отношению к силановым группам [12].

Добавление  $\text{SiO}_2$  в высоких концентрациях (20–50 мас. % с размером частиц от 20 до 50 нм) значительно повышает прочность и твердость материала [13]. Частицы на основе диоксида кремния являются наиболее часто используемым неорганическим наполнителем за счет согласованного показателя преломления света с мономерами органической матрицы, высокой стабильности, оптимальными механическими свойствами и т. д. [14]. Сферические частицы наполнителя диоксида кремния синтезируются методом золь-гель из коллоидного раствора по процессу Штобера. Этот метод является наиболее простым и эффективным способом получения наноразмерных сфер поскольку реагенты являются доступными, а условия реакции контролируемые [15]. Введение наночастиц  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  также оказывает значительное влияние на износостойкость светоотверждаемых композитов [1]. По данным экспериментальных исследований Shiv RK, Amar P. (2017) композит с наполнителем  $\text{ZrO}_2$  имел гладкую, ровную, без пустот поверхность [16]. Прочные межфазные контакты между модифицированными наночастицами и органической матрицей, а также однородное распределение жестких неорганических наночастиц также могут способствовать этому улучшению [17].

Исследования показали, что нанокompозиты, содержащие мономодальные наноразмерные наполнители, обеспечивают отличную эстетику и полируемость, но в то же время демонстрируют недостаточные трибологические свойства (устойчивость к истиранию и износу) для универсального применения. Для решения этих проблем в дополнение к наноразмерным частицам в рецептуру стоматологических композитов вводятся частицы микронного размера, нанокластеры или предварительно полимеризованные композитные наполнители, содержащие в своем составе субмикронные частицы [18]. Нанокластеры – это стойкие агломераты наночастиц, которые увеличивают вязкость композита по сравнению с отдельными наночастицами, эффективно поглощают энергию, повышают прочность [19]. Нанокластеры могут образовываться за счет плотного слияния наночастиц, обычно  $\text{SiO}_2$  или  $\text{ZrO}_2$ , либо гибридных частиц. Несколько частиц сливаются вместе, образуя крупный кластер с ковалентными связями

ми. Силан-модифицирующий агент может проникать в зазоры нанокластеров, улучшая механическую прочность. Бимодальные нанокластеры  $\text{SiO}_2$  (силикатные нанокластеры) – крупные агломерированные частицы, состоящие из множества силикатных наночастиц и агрегатов с полостями, имеют размерный ряд в диапазоне 0,07–2,70 мкм. Исследования Wang R. и соавт. (2013) показали, что когда композиты содержали 70 мас.% наполнителя (50 мас.% бимодального нанокластера  $\text{SiO}_2$  и 20 мас.% одномодального  $\text{SiO}_2$ ), прочность на изгиб ( $104,8 \pm 4,4$  МПа), модуль упругости ( $6,2 \pm 0,3$  ГПа) и прочность на сжатие ( $205,8 \pm 14,3$  МПа) у них были соответственно на 28, 48 и 42% выше, чем у композитов, заполненных одномодальным  $\text{SiO}_2$  (60 мас.%) без бимодального  $\text{SiO}_2$  [20]. Нанокластеры могут поглощать стресс, который способствует росту трещин, и, таким образом, повышать прочность на разрушение [21]. Они обеспечивают стабильность интерфейса филлер-матрица, благодаря большей площади поверхности, чем наполнители микронного размера. Нанокластеры определяют высокие эстетические свойства, связанные с более длительным сохранением гладкости поверхности композитной реставрации в полости рта. Агломерированная структура филлера при функциональных нагрузках имеет тенденцию к частичному разрушению, в отличие от наполнителей микронного размера, утрата которых с поверхности пломбы приводит к резкому снижению блеска [22]. В научной литературе представлены данные, которые указывают на то, что нанокластеры, несмотря на больший размер частиц, чем отдельные наночастицы, позволяют получать композитные материалы с улучшенными свойствами, такими как лучший блеск, полируемость и износостойкость [23].

Комбинирование нанокластеров с наночастицами в качестве наполнителей позволило получить композиты с наименьшей полимеризационной усадкой (2,2%) и наибольшей прочностью на изгиб (113,91 МПа) [24].

При разработке усовершенствованных композитных материалов важную роль играют не только размер, состав, но и распределение, форма, морфология, пористость и поверхностные свойства частиц наполнителя [22]. Наиболее распространенная морфологическая форма неорганических наполнителей в современных композитах – это сочетание сферических и иррегулярных частиц [25]. В рамках исследования, проведенного Kim K.H. с соавт. (2002), были протестированы коммерческие композиты, имеющие различную морфологию наполнителя – неправильной формы и сферические частицы. Результаты показали, что сферическая форма наполнителя позволяет максимально увеличить его процентное содержание в композите. Повышение наполненности ведет к улучшению физических свойств (прочность на изгиб, модуль упругости, твердость и вязкость) [26]. Tamura Y. и др. (2011) также сообщили, что размер сферических неорганических наполнителей может влиять на прочностные свойства композитных материалов [27]. Форма филлеров влияет на равномерность и плотность распределения в объеме композита, поверхностную энергию, удержание в органической матрице. Она влияет на степень износа поверхности, блеск и скорость

полирования реставрации [28]. Поэтому морфология наполнителя (геометрия формы, структура поверхности) для определения конечных свойств композита не менее важна, чем его химический состав [29]. Разработка отечественных стоматологических композитов с улучшенными физико-механическими характеристиками является перспективным направлением. Это позволит создавать материалы, более близкие по свойствам к твердым тканям зуба, что обеспечит долговечность пломб. При этом улучшение таких характеристик, как прочность, твердость и эластичность позволит повысить не только эффективность, но и эстетическую составляющую стоматологического лечения.

**Целью** настоящего исследования явилось проведение оценки морфологии и размеров неорганического наполнителя нескольких современных коммерческих стоматологических реставрационных светоотверждаемых композитных материалов и экспериментального композита.

### Материалы и методы

В соответствии с поставленной целью были проведены исследования по изучению и сравнительной оценке морфологии наполнителей нескольких современных коммерческих стоматологических композитов и экспериментального композитного материала, содержащих наноразмерные филлеры, методом сканирующей электронной микроскопии. Были проанализированы морфологические характеристики дискретных наполнителей универсальных светоотверждаемых коммерческих композитов отечественного и импортного производства: Эстелюкс НК, ДентЛайт-нано, Estelite Asteria, Estelite Sigma Quick, Estelite Universal Flow Medium, используемых для прямых реставраций как передних, так и жевательных зубов и экспериментального композита.

Состав исследуемых композитов, описанный производителями в инструкциях, представлен в таблице.

Для исследования формы и размера наполнителей были изготовлены 6 образцов, по одному из каждого из изучаемых стоматологических композитных материалов. Композиты выкладывали в силиконовые формы диаметром 10 мм и высотой 2 мм и отверждали с использованием стоматологической фотополимеризующей лампы Turbodont (Dental ABC, Китай) с мощностью 1000 мВт/см<sup>2</sup>, облучая световым потоком 420–480 нм в течение 2 минут с каждой стороны, минимум в трех точках, фиксируя световод на расстоянии 3 мм от поверхности образцов. Отвержденные композиты заливали в эпоксидную смолу и далее шлифовали и полировали на установке Tegramin 30 (Struers, Дания) до сухого блеска. Для полировки поверхности образцов использовали шлифовальные диски на основе карбида кремния с зернистостью от 60 мкм до 5 мкм.

Исследование микроструктуры полученных образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 LMH (Tescan, Брно, Чешская Республика), оснащённого детекторами вторичных (SE) и отраженных (BSE) электронов. Средний диаметр наполнителей каждого образца определяли измерением 50 ча-

Состав исследуемых композитов, описанный производителями в инструкциях

Композит	Матрица	Наполнитель
Estelite Universal Flow Medium, Tokuyama Dental; Япония	Bis-GMA Bis-MPEPP TEGDMA UDMA Меквинол Дибутил-гидроксилтолуол УФ-абсорбер	Сферический $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ (средний размер 200нм, фракционный состав 100–300 нм) и композитный наполнитель, содержащий в составе сферический $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$
Estelite Asteria, Tokuyama Dental; Япония	Bis-GMA Bis-MPEPP TEGDMA UDMA Меквинол Дибутил-гидроксилтолуол УФ-абсорбер	Сферический $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ (средний размер 200нм, фракционный состав 100–300 нм)
Estelite Sigma Quick, Tokuyama Dental; Япония	Bis-GMA TEGDMA	Сферический $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ (средний размер частиц 0,2 мкм; фракционный состав частиц от 0,1 до 0,3 мкм) и композитный наполнитель
Эстелюкс НК, СтомаДент; Россия	UDMA, BisGMA, TEGDMA бутилированный гидроксилтолуол, триметакрилат триэтаноламин	Барьерное алюмоборосиликатное стекло, стекло ПМ3, стеклонаполнитель GM 32087, стеклонаполнитель Nano Fine 27884, окись алюминия 1 мк
ДентЛайт-нано, ВЛАДМИВА; Россия	BIS-GMA, UDMA, PGDMA, BIS-EMA, TEGDMA, TMPTMA	Модифицированное барий-бор-алюмо-фтор-силикатное стекло (0,02–3 мкм), наноразмерные поверхностно-модифицированные частицы диоксида кремния (20 нм), поверхностно-модифицированный цирконий-кремневый наполнитель (0,1–10 мкм)
Экспериментальный композит	BIS-GMA, UDMA	Упрочненный сферический $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ (средний размер частиц 400 нм ( $\text{SiO}_2$ ) и 220 нм ( $\text{ZrO}_2$ ))

стиц. Поскольку стоматологические композиты не проводят электрический ток на них предварительно перед исследованием СЭМ было нанесено тонкое токопроводящее покрытие из золота методом магнетронного напыления на установке QuorumQ150ES (Quorum Technologies, Великобритания). Съемку проводили с помощью цифровой камеры.

### Результаты и обсуждение

На рисунках 1–6 представлены характерные снимки микроструктуры исследуемых образцов стоматологических композитов: трех зарубежных коммерческих материалов (рис. 1, 2, 3), двух отечественных коммерческих материалов (рис. 4, 5) и оригинального экспериментального композита, разработанного командой авторов (рис. 6). Желтым пунктиром обозначены филлеры, состоящие из нанокластеров. Белым прямоугольным пунктирным контуром выделены зоны, которые были увеличены и отображены справа.

Анализ СЭМ изображений образцов показал, что все представленные к изучению композитные материалы отличаются широким диапазоном форм и размеров наполнителей.

Для композита Estelite Universal Flow medium (рис. 1) характерно наличие включений крупных частиц композитного преполимеризованного наполнителя (3–30 мкм) преимущественно сферической формы хаотично распределенных в объеме композита (выделено желтым пунктирным кругом). При большем увеличении хорошо визуализируется, что данные конгломераты состоят из наноразмерных сфер (менее 200 нм), аналогичных по размеру дискретному сферическому наполнителю, тотально заполняющему полимерную матрицу материала.

Композиты Estelite Asteria (рис. 2) и Estelite Sigma Quick (рис. 3) имеют схожую микроструктуру. Оба композита содержат большое количество преполимеризованных кластеров иррегулярной формы (обозначены желтыми кругами), распределенных по всему объему композита. Размер кластеров значительно варьирует от 3 до 40 мкм. При большем увеличении видно, что кластеры образованы наночастицами сферической формы с размерами до 200 нм. Также как и для композита Estelite Universal Flow medium пространство между кластерами плотно заполнено отдельными наноразмерными сферическими частицами, такими же, что и входящими в состав кластеров. Стоит отметить, что в композитном материале Estelite Sigma Quick, средний размер частиц был меньше, чем в двух предыдущих, и составил 150 нм.

Для всех трех образцов импортных композитов отмечается очень плотная упаковка наполнителя, участков связующей фазы полимерной матрицы практически не видно на микроструктурных снимках поверхности.

Российские нанокompозитные материалы Эстелюкс НК (рис. 4) и ДентЛайт-нано (рис. 5) имеют схожую осколчатую форму частиц наполнителя, отличающуюся размерами. Наполнитель композита Эстелюкс НК имеет значительно меньший размер частиц по сравнению с наполнителем композита ДентЛайт-нано. Основной объем образца Эстелюкс НК заполнен частицами до 7 мкм (рис. 4). Также видно, что в составе присутствует преполимеризованные кластеры микронного размера с диапазоном размеров от 5 до 30 мкм (желтые круги), образованные наноразмерными сферическими частицами (менее 100 нм). Данный композит имеет высокое наполнение, однако на шлифе присутствуют участки только полимерной матрицы.

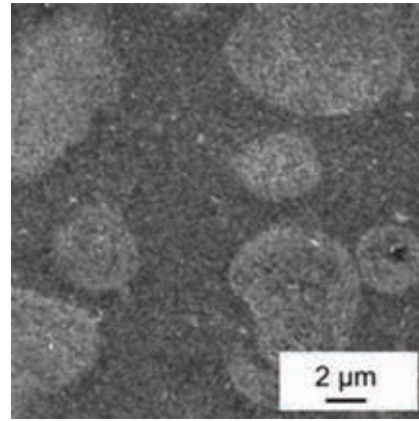
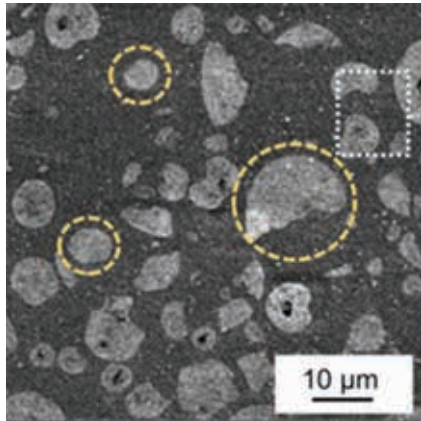


Рисунок 1. Микроструктура композита Estelite Universal Flow medium

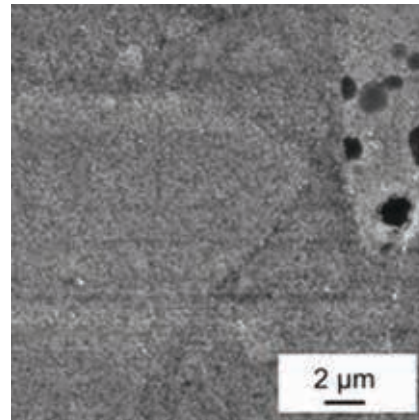
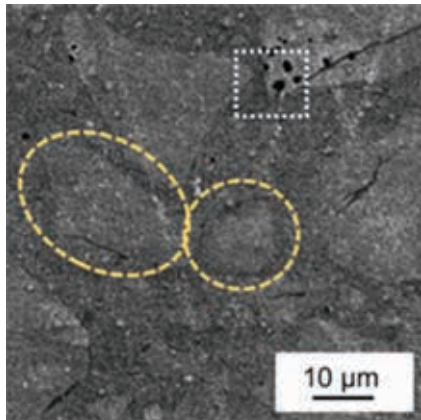


Рисунок 2. Микроструктура композита Estelite Asteria

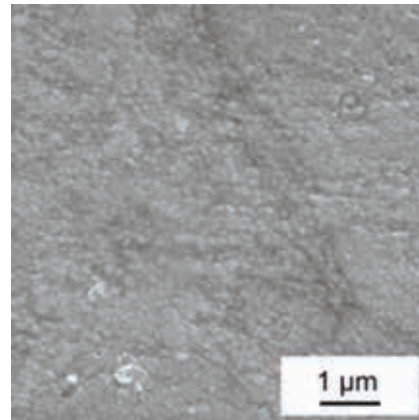
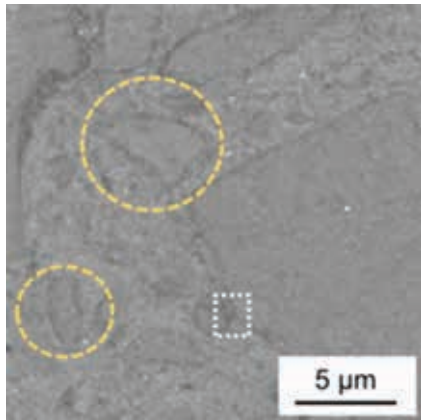


Рисунок 3. Микроструктура композита Estelite Sigma Quick

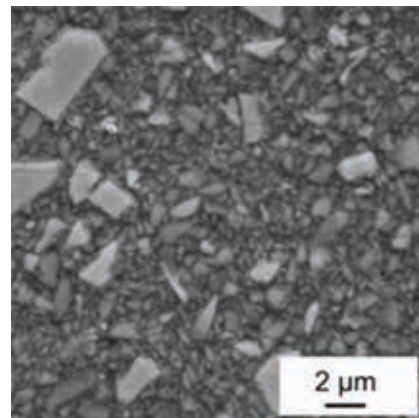
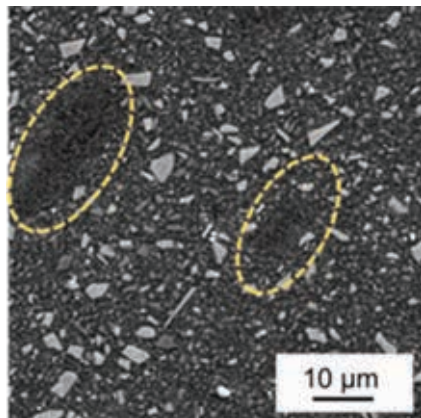


Рисунок 4. Микроструктура композита Эстелюкс НК

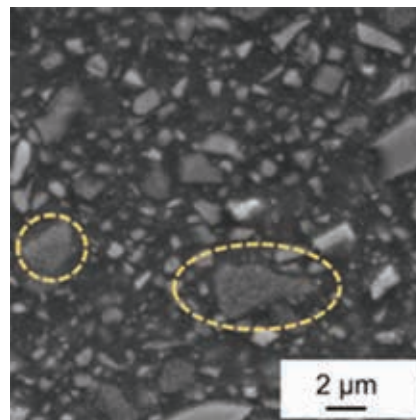
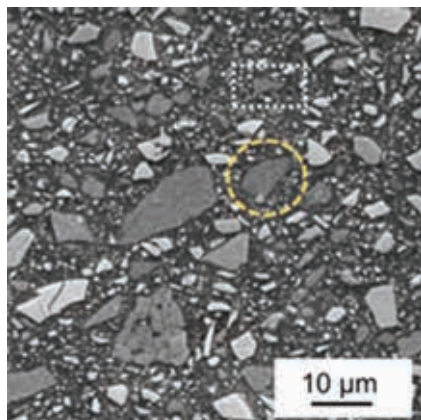


Рисунок 5. Микроструктура композита ДентЛайт-нано

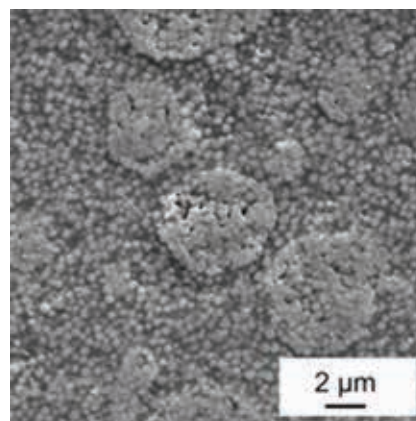
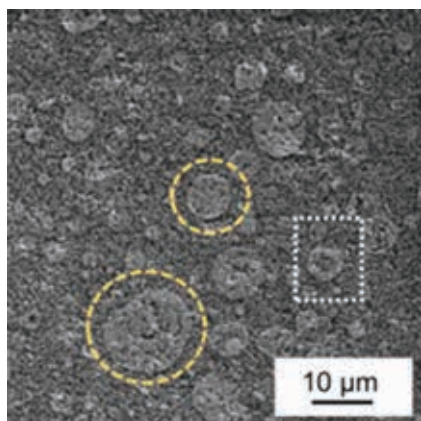


Рисунок 6. Микроструктура экспериментального образца

Композит ДентЛайт-нано также наполнен частицами оскользящей формы, подобными наполнителю Эстелюкс НК, но имеющими увеличенный размер (до 20 мкм). В композите присутствуют небольшие кластеры до 5 мкм (на рис. справа желтые круги), состоящие из наноразмерных частиц менее 100 нм. Кроме того, в данном материале определяются значительные участки незаполненной полимерной матрицы, в отличие от всех композитов описанных выше.

Экспериментальный образец стоматологического композита (рис. 6) содержит в своем составе микросферы с диапазоном размеров от 5 до 20 мкм, состоящие из наноразмерных частиц сферической формы до 450 нм. На снимках микроструктуры наблюдается полимодальное распределение крупных микросфер и наноразмерных сферических частиц в объеме полимерной матрицы. При большем увеличении визуализируется плотное равномерное заполнение матрицы филлером, все элементы наполнения хорошо диспергированы в связующей фазе и имеют с ней плотное сцепление.

### Заключение

Анализ морфологии наполнителей и оценка их размеров показала, что все исследуемые образцы импортных композитных материалов имели филлеры, сходные по форме и размеру. Они содержат крупные предварительно полимеризованные кластеры от 3 до 30 мкм,

включающие практически моноразмерные частицы сферической формы размером менее 200 нм в диаметре, и отдельные наноразмерные сферические частицы менее 200 нм, тотально заполняющие площадь поверхности образцов. Наполнители коммерческих нанокompозитных материалов отечественного производства имели оскользящую форму частиц и кластеры микронного размера от 5 до 30 мкм, которые были образованы наноразмерными сферическими частицами менее 100 нм, в образцах определялись участки свободной полимерной матрицы. Экспериментальный композитный материал по морфологической структуре, размеру и распределению наполнителя наиболее сопоставим с наполнителем стоматологического композита импортного производства Estelite Universal Flow medium. Технология комбинирования сферических микросфер с дискретным сферическим филлером обеспечивает равномерность и высокую плотность распределения частиц.

### Список литературы / References

1. Azmy E. et al. Impact of nanoparticles additions on the strength of dental composite resin // *International Journal of Biomaterials*. – 2022. – Т. 2022. – №. 1. – С. 1165431. <https://doi.org/10.1155/2022/1165431>.
2. Крихели Н.И., Бычкова М.Н., Крамар О.В. и др. Применение светоотверждаемых наноуполненных композитных материалов в стоматологии (Обзор литературы) // *Мед. алфавит*. 2023. Т. 30, 70–73. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2023-30-70-73>.  
Krikheli N.I., Bychkova M.N., Kramar O.V. et al. Application of light-cured nanofilled composite materials in dentistry (Literature review) // *Med. alphabet*. 2023. Vol. 30, 70–73. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2023-30-70-73>.
3. Wang R., Habib E., Zhu X. X. Application of close-packed structures in dental resin composites // *dental materials*. – 2017. – Т. 33. – №. 3. – С. 288–293. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.12.006>

4. Barghamadi H. et al. Effects of nanoparticle size and content on mechanical properties of dental nanocomposites: experimental versus modeling // *Iranian Polymer Journal*. – 2015. – V. 24. – No. 10. – P. 837–848. <https://doi.org/10.1007/s13726-015-0369-5>.
5. Ferracane J. L. A historical perspective on dental composite restorative materials // *Journal of Functional Biomaterials*. – 2024. – V. 15. – No. 7. – P. 173. <https://doi.org/10.3390/jfb15070173>.
6. Bingül A. et al. A Review: Resin-Based Dental Materials and Their Characterization // *Polymers for Advanced Technologies*. – 2025. – V. 36. – No. 6. – P. e70239.
7. Ghods K. et al. Newest Developments of Nanotechnology in Dentistry: A Review of Literature // *Journal of Dental Materials & Techniques*. – 2022. – V. 11. – No. 1. <https://doi.org/10.22038/jdmt.2022.61473.1488>.
8. Jandt K. D., Watts D. C. Nanotechnology in dentistry: Present and future perspectives on dental nanomaterials // *Dental Materials*. – 2020. – V. 36. – No. 11. – P. 1365–1378. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.08.006>.
9. Fujita K., Ikemi T., Nishiyama N. Effects of particle size of silica filler on polymerization conversion in a light-curing resin composite // *Dental Materials*. – 2011. – V. 27. – No. 11. – P. 1079–1085. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.07.010>.
10. Timpe N. et al. Nanoporous silica nanoparticles with spherical and anisotropic shape as fillers in dental composite materials // *BioNanoMaterials*. – 2014. – V. 15. – No. 3–4. – P. 89–99. <https://doi.org/10.1515/bnm-2014-0010>.
11. Pratap B. et al. Resin based restorative dental materials: Characteristics and future perspectives // *Japanese Dental Science Review*. – 2019. – V. 55. – No. 1. – P. 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2019.09.004>.
12. Habib E., Wang R., Zhu X. X. Monodisperse silica-filled composite restoratives mechanical and light transmission properties // *Dental Materials*. – 2017. – V. 33. – No. 3. – P. 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.12.008>.
13. Barghamadi H. et al. Effects of nanoparticle size and content on mechanical properties of dental nanocomposites: experimental versus modeling // *Iranian Polymer Journal*. – 2015. – V. 24. – No. 10. – P. 837–848. <https://doi.org/10.1007/s13726-015-0369-5>.
14. Cho K. et al. Dental resin composites: A review on materials to product realizations // *Composites Part B: Engineering*. – 2022. – V. 230. – P. 109495. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109495>.
15. Крихели Н.И., Бычкова М.Н., Мендоса Е.Ю., Руднева О.В., Кузнецова Е.В., Курмышева А.Ю., Перетягин П.Ю. Изучение морфологии и химического состава наноразмерных сферических частиц диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>), полученных золь-гель методом. *Российская стоматология*. 2024;17(4):12–17. <https://doi.org/10.17116/rossstomat202417112>  
Krikheli N.I., Bychkova M.N., Mendoza E.Yu., Rudneva O.V., Kuznetsova E.V., Kurmysheva A.Yu., Peretyagin P.Yu. Study of the morphology and chemical composition of nanosized spherical particles of silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) obtained by the sol-gel method. *Rossiiskaja stomatologija*. 2024;17(4):12–17. <https://doi.org/10.17116/rossstomat202417112>.
16. Shiv R. K., Amar P. The in vitro wear behavior of nanozirconia filled dental composite in food slurry condition // *The Journal of Engineering Tribology*. – 2017. – V. 231. – No. 1. – P. 33–40. <https://doi.org/10.1177/1350650116641329>.
17. Kundie F. et al. Effects of filler size on the mechanical properties of polymer-filled dental composites: A review of recent developments // *J. Phys. Sci.* – 2018. – V. 29. – No. 1. – P. 141–165. <https://doi.org/10.21315/jps2018.29.1.10>.
18. Rodríguez H. A., Kriven W. M., Casanova H. Development of mechanical properties in dental resin composite: Effect of filler size and filler aggregation state // *Materials Science and Engineering: C*. – 2019. – T. 101. – C. 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.03.090>.
19. Liu J. et al. The development of filler morphology in dental resin composites: A review // *Materials*. – 2021. – V. 14. – No. 19. – P. 5612. <https://doi.org/10.3390/ma14195612>.
20. Wang R. et al. Wear behavior of light-cured resin composites with bimodal silica nanostructures as fillers // *Materials Science and Engineering: C*. – 2013. – V. 33. – No. 8. – P. 4759–4766. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2013.07.039>.
21. Randolph L. D. et al. Filler characteristics of modern dental resin composites and their influence on physico-mechanical properties // *Dental Materials*. – 2016. – V. 32. – No. 12. – C. 1586–1599. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.09.034>.
22. Aminoroaya A. et al. A review of dental composites: Challenges, chemistry aspects, filler influences, and future insights // *Composites Part B: Engineering*. – 2022. – T. 216. – P. 108852. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108852>.
23. Habib E. et al. Inorganic fillers for dental resin composites: present and future // *ACS biomaterials science & engineering*. – 2016. – V. 2. – No. 1. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.5b00401>.
24. Hategekimana F., Kiraz N. Preparation and characterization of silica based nanostructures as reinforcement for dental applications // *Polymer Composites*. – 2022. – T. 43. – No. 10. – C. 7564–7574. <https://doi.org/10.1002/polc.26857>.
25. Habib E., Wang R., Zhu X. X. Monodisperse silica-filled composite restoratives mechanical and light transmission properties // *Dental Materials*. – 2017. – V. 33. – No. 3. – P. 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.12.008>.
26. Kim K.H., Ong J.L., Okuno O. The effect of filler loading and morphology on the mechanical properties of contemporary composites // *The Journal of prosthetic dentistry*. – 2002. – V. 87. – No. 6. – CP. 642–649. <https://doi.org/10.1067/jmpr.2002.125179>.
27. Tamura Y., Kakuta K., Ogura H. Wear and mechanical properties of composite resins consisting of different filler particles // *Odontology*. – 2013. – V. 101. – No. 2. – P. 156–169. <https://doi.org/10.1007/s10266-012-0074-1>.
28. Amaya-Pajares S. P. et al. Development and maintenance of surface gloss of dental composites after polishing and brushing: Review of the literature // *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. – 2022. – V. 34. – No. 1. – P. 15–41. <https://doi.org/10.1111/jerd.12875>.
29. Liu J. et al. The development of filler morphology in dental resin composites: A review // *Materials*. – 2021. – V. 14. – No. 19. – P. 5612. <https://doi.org/10.3390/ma14195612>.

Статья поступила / Received 17.11.2025

Получена после рецензирования / Revised 20.11.2025

Принята в печать / Accepted 21.11.2025

#### Информация об авторах

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

**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. eLibrary SPIN: 6284-8065.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9053-496X>

**Бычкова Марина Николаевна**<sup>1</sup> – к.м.н., доцент кафедры клинической стоматологии  
E-mail: stommarina@mail.ru. eLibrary SPIN: 2968-4020.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2173-7779>

**Мендоса Елена Юрьевна**<sup>1</sup> – ассистент кафедры клинической стоматологии  
E-mail: mendosae@mail.ru. eLibrary SPIN: 3192-8412.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7517-4361>

**Руднева Ольга Витальевна**<sup>1</sup> – заместитель начальника управления науки, ассистент кафедры клинической стоматологии  
E-mail: rudneva\_ov@bk.ru. eLibrary SPIN: 7874-4789.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0225-2773>

**Перетягин Никита Юрьевич**<sup>1,2</sup> – инженер лаборатории новых технологий и медицинских материалов, младший научный сотрудник лаборатории искрового плазменного спекания  
E-mail: peretyagin.nikita@yandex.ru. eLibrary SPIN: 6715-8659.  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4905-5653>

**Шехтман Семен Романович**<sup>2</sup> – профессор кафедры высокоэффективных технологий и обработки  
eLibrary SPIN: 4885-5220

**Кузнецова Екатерина Викторовна**<sup>2</sup> – научный сотрудник кафедры высокоэффективных технологий и обработки  
E-mail: e.kuznetsova@stankin.ru. eLibrary SPIN: 2342-1839.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9550-9816>

**Курмышева Александра Юрьевна**<sup>2</sup> – младший научный сотрудник научной группы кафедры высокоэффективных технологий и обработки  
E-mail: aukurm@gmail.com. eLibrary SPIN: 9549-8021 ORCID: 000-0002-5785-8556

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, Москва, Россия  
<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «МГТУ» СТАНКИН», Москва, Россия

#### Контактная информация:

Бычкова Марина Николаевна. E-mail: stommarina@mail.ru

**Для цитирования:** Крихели Н.И., Перетягин П.Ю., Бычкова М.Н., Мендоса Е.Ю., Руднева О.В., Перетягин Н.Ю., Шехтман С.Р., Кузнецова Е.В., Курмышева А.Ю. Оценка морфологии наполнителей современных стоматологических наноконструктивных материалов. *Медицинский алфавит*. 2025;(30):156–162. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-30-156-162>

#### Author information

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

**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. eLibrary SPIN: 6284-8065.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9053-496X>

**Bychkova Marina N.**<sup>1</sup> – CM Sci, Associate Professor of the Department of Clinical Dentistry  
E-mail: stommarina@mail.ru. eLibrary SPIN: 2968-4020.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2173-7779>

**Mendoza Elena Yu.**<sup>1</sup> – Associate Professor of the Department of Clinical Dentistry.  
E-mail: mendosae@mail.ru. eLibrary SPIN: 3192-8412.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7517-4361>

**Rudneva Olga V.**<sup>1</sup> – Deputy Head of the Department of Science, Assistant of the Department of Clinical Dentistry.  
E-mail: rudneva\_ov@bk.ru. eLibrary SPIN: 7874-4789.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0225-2773>

**Peretyagin Nikita Yu.**<sup>1,2</sup> – Engineer of the Laboratory of New Technologies and Medical Materials, Junior researcher at the «Highly Effective Processing Technologies»  
E-mail: peretyagin.nikita@yandex.ru. eLibrary SPIN: 6715-8659.  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4905-5653>

**Shekhtman Semyon R.**<sup>2</sup> – Professor of the Department of Highly Efficient Technologies and Processing, MSTU  
eLibrary SPIN: 4885-5220.

**Kuznetsova Ekaterina V.**<sup>2</sup> – Researcher, Department of Highly Efficient Technologies and Processing  
E-mail: e.kuznetsova@stankin.ru. eLibrary SPIN: 2342-1839.  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9550-9816>

**Kurmysheva Alexandra Yu.**<sup>2</sup> – Junior Researcher, Researcher, Department of Highly Efficient Technologies and Processing  
E-mail: aukurm@gmail.com. eLibrary SPIN: 9549-8021 ORCID: 000-0002-5785-8556

<sup>1</sup> Russian University of Medicine of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia  
<sup>2</sup> Moscow State University of Technology («STANKIN»), Moscow, Russia

#### Contact information

Bychkova Marina N. E-mail: stommarina@mail.ru

**For citation:** Krikheli N.I., Peretyagin P.Yu., Bychkova M.N., Mendoza E.Yu., Rudneva O.V., Peretyagin N.Yu., Shekhtman S.R., Kuznetsova E.V., Kurmysheva A.Yu. Evaluation of the morphology of fillers of modern dental nanocomposite materials. *Medical alphabet*. 2025;(30):156–162. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2025-30-156-162>

