Научная статья

УДК 666.3
DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-110-124

ОБЗОР КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ИЗ ПОЛИМЕРОВ (PDC)*
Часть 3. Микроструктура и применение

Н.М. Паращенко[1], М.С. Кожухаров[1]

[1]Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. *Статья посвящена исследованию микроструктуры и применению керамических материалов, получаемых из полимерных прекурсоров (Polymer-Derived Ceramics (PDC)). Рассмотрены методы анализа микроструктуры, включая спектроскопические и микроскопические подходы, а также ключевые аспекты ее эволюции при высокотемпературной обработке. Особое внимание уделено влиянию нанодоменов и свободного углерода на формирование свойств PDC-материалов. Обсуждены перспективные области применения таких материалов, включая композиты, покрытия, микроэлектронику и энергетику.*

Ключевые слова: *PDC-материал, микроструктура, нанодомены, функциональные свойства, свободный углерод, пиролиз*

Для цитирования: Паращенко Н.М., Кожухаров М.С. Обзор керамических материалов, получаемых из полимеров (PDC). Часть 3. Микроструктура и применение // Труды ВИАМ. 2026. № 11 (165). С. 110–124. URL: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-110-124.

Scientific article

REVIEW OF POLYMER-DERIVED CERAMICS (PDC)
Part 3. Microstructure and applications

N.M. Parashchenko[1], M.S. Kozhukharov[1]

[1]Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. *The article focuses on the study of the microstructure and applications of polymer-derived ceramic (PDC) materials. It examines microstructure analysis techniques, including spectroscopic and microscopic approaches, along with key aspects of the evolution of of the microsructure during high-temperature processing. Special attention is given to the role of nanodomains and free carbon in shaping PDC properties. Promising application areas for such materials are discussed, including composites, coatings, microelectronics, and energy technologies.*

Keywords: *PDC material, microstructure, nanodomains, functional properties, free carbon, pyrolysis*

For citation: Parashchenko N.M., Kozhukharov M.S. Review of polymer-derived ceramics (PDC). Part 3. Microstructure and applications. *Trudy VIAM*, 2026, no. 11 (165), pp. 110–124. Available at: http://www.viam-works.ru. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-11-110-124.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 8 (150), 2025; часть 2 – см. «Труды ВИАМ», № 4 (158), 2026.

Введение

Керамика на основе полимерных прекурсоров (Polymer-Derived Ceramics (PDC)) – актуальное направление в современном материаловедении, так как позволяет объединить технологические параметры полимеров и керамических материалов. Главная особенность PDC-материалов – возможность управления составом и микроструктурой на молекулярном уровне за счет контролируемого пиролиза, что выгодно отличает их от традиционной керамики, получаемой классическими методами.

В современной научно-технической литературе подчеркиваются уникальные характеристики PDC-материалов, среди которых термостабильность, стойкость к окислению и механическая прочность, напрямую связанные с их структурой на наноуровне [1–5]. Особое внимание исследователей привлекает поведение этих материалов в условиях высоких температур: именно в этом случае становится очевидной функция нанодоменов и свободной углеродной фазы, препятствующих кристаллизации и способствующих сохранению аморфного строения.

Технология получения PDC-материалов привлекательна, прежде всего, тем, что позволяет применять классические методы переработки полимеров (литье, экструзия) для формования изделий со сложной геометрической формой. Этот подход особенно востребован в областях, где сложная форма детали должна сочетаться с термостойкостью и высокими функциональными характеристиками – в аэрокосмической отрасли, энергетике и микроэлектронике.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Анализ микроструктуры керамических материалов из полимеров

Полимерно-керамические системы относятся к классу сложных материалов, в которых при термическом воздействии (>1000 °C) наблюдаются выраженные изменения на микроструктурном уровне. Основные свойства, такие как термостойкость, устойчивость к кристаллизации и термическому разложению, в значительной степени зависят от организации аморфной фазы (рис. 1). Одной из наиболее примечательных особенностей этих материалов является наличие в микроструктуре нанодоменов, специфическая природа которых предположительно служит фундаментальным фактором, определяющим их высокую термическую стабильность и устойчивость к кристаллизации даже в условиях экстремальных температур [6, 7].

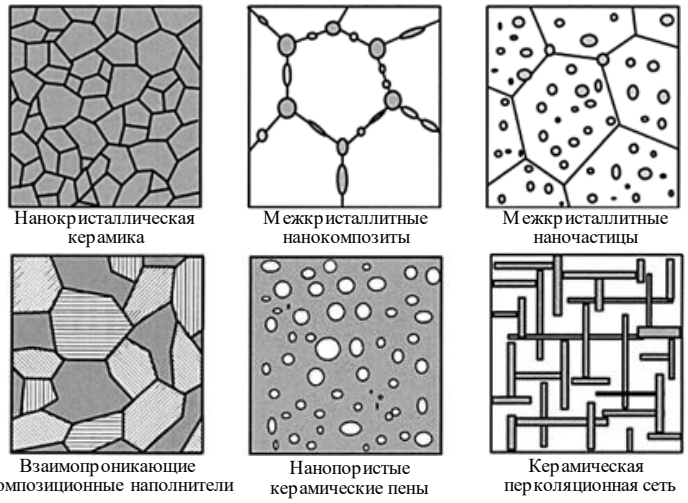


Рис. 1. Возможные микроструктуры PDC-материалов

Такие материалы способны сохранять аморфную структуру в интервале температур 1000–1800 °C. При повышении температуры запускается процесс девитрификации (раскристаллизации) аморфной сетки, приводящий к локальной кристаллизации различных фаз, вызывающей фазовое разделение, что создает условия для зарождения и роста нанокристаллов.

Можно выделить несколько этапов микроструктурной трансформации PDC-материалов при переходе от аморфного к частично кристаллическому состоянию:

– фазовое разделение в процессе обжига;
– выделение и графитизация свободной углеродной фазы;
– локальное образование нанокристаллов.

Микроструктуру керамических материалов исследуют различными способами, которые можно разделить на две принципиальные категории. Одни методы, такие как ядерный магнитный резонанс (ЯМР), дифракция рентгеновских лучей, высокоэнергетическая рентгеновская дифракция, малоугловое рентгеновское и нейтронное рассеяние, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье и рамановская спектроскопия, предоставляют усредненные данные для всего объема образца. Другие методы, в том числе просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия, спектроскопия характеристических потерь энергии электронов и энергофильтрующая просвечивающая электронная микроскопия, позволяют детально изучить локальные особенности структуры на наноуровне. За формирование наноструктурной керамики из полимерного состояния в основном отвечает несвязанный с кремнием свободный углерод, анализ которого имеет первостепенное значение.

Рамановская спектроскопия

Рамановская спектроскопия позволяет подтвердить наличие графеновых слоев углерода. Локальные неоднородности состава или распределения фаз обычно проявляются на наноуровне, тогда как разрешение рамановской спектроскопии достигает нескольких микрометров, что ведет к усреднению сигнала по исследуемому объему [8–10].

Как видно на рис. 2, основные характеристики свободного углерода в спектрах комбинационного рассеяния PDC-материалов включают полосу *D*, возникающую вследствие разупорядочивания (1350 и 1620 см$^{-1}$), полосу *G* (~1582 см$^{-1}$), обусловленную растяжением связей sp^2-углерода, а также *G′*-полосу (обертон *D*-полосы, наблюдаемый в бездефектных образцах при 2700 см$^{-1}$). В спектре углерода также присутствует рамановская аномалия при 2950 см$^{-1}$, связанная с комбинированной *модой D + G* и вызванная разупорядочиванием [11].

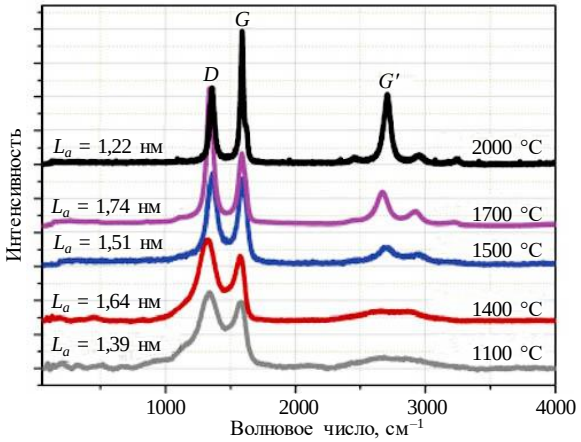


Рис. 2. Пример эволюции углеродной фазы при термической обработке богатой углеродом SiCN-керамики [11]: L_a – средний размер углеродных кластеров

Авторы работы [12] представили количественный метод для определения уровня свободного углерода в SiCN-керамике, опираясь на рамановскую спектроскопию (рис. 3). Показано, что объемное соотношение Si и SiCN (V_{Si}/V_{SiCN}) линейно коррелирует с нормированным соотношением интенсивностей спектральных линий Si и C ($I_{Si}/I_C \cdot K$). Крутизна полученной кривой отражает концентрацию углерода в SiCN-керамике. В рамках данного эксперимента средний размер углеродных кластеров, обозначенный как L_a, установлен на уровне 2,4±0,2 нм.

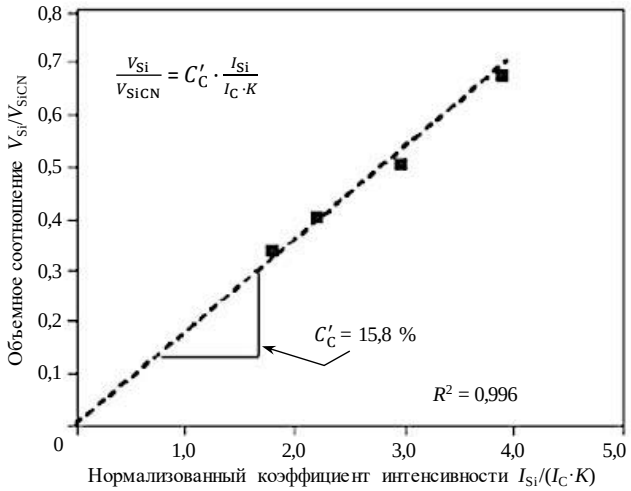


Рис. 3. Зависимость объемного соотношения Si и SiCN от нормированного коэффициента интенсивности рамановского спектра 12]: V_{Si}, V_{SiCN} – объемная доля фаз Si и SiCN соответственно; I_{Si}, I_C – интенсивность рамановской линии Si и C; K – калибровочный коэффициент; C'_C – калибровочный коэффициент соотношения

Твердотельная ЯМР-спектроскопия

В работах, посвященных полисилазанам и полисилилкарбодиимидам, на основе данных по изотопу ^{29}Si, полученных методом твердотельной ЯМР-спектроскопии, показано, что в зависимости от типа прекурсора микроструктура аморфной керамики SiCN существенно меняется. Так, в полисилазанах наблюдается однофазная аморфная структура SiC_xN_y (где $x + y = 4$), а полисилилкарбодиимиды представляют собой двухфазную аморфную систему, состоящую в основном из углеродных и аморфных кластеров Si_3N_4 [13].

Применение полисилилкарбодиимидов в качестве прекурсоров для SiCN-керамики способствует формированию аморфных структур, которые, в свою очередь, ингибируют образование термодинамически устойчивых кристаллических фаз, таких как Si_3N_4 и SiC. Так, аморфные фазы SiCN, полученные из полисилилкарбодиимидов, начинают трансформироваться в кристаллический карбид кремния при температуре ~1600 °C. Кристаллизация аналогичных материалов с идентичным соотношением C/Si, но синтезированных из силазанов, происходит при температуре на 50–100 °C меньше [14].

На рис. 4 представлены типичные микроструктуры нанодоменов. Термическое разложение высокоуглеродистых полисилилкарбодиимидов [11] при 1100 °C приводит к образованию SiCN-керамики, включающей три аморфные фазы: Si_3N_4, углерод и дисперсные домены SiC [7, 15].

Данные, полученные с помощью твердотельной ЯМР-спектроскопии для SiBCN-керамики, указывают на то, что окружение атомов бора находится в прямой зависимости от соотношения содержания Si и B, а также от используемого предкерамического полимера. Подтверждением миграции атомов азота от кремниевых участков

к атомам бора в процессе перехода полимера в керамическое состояние служит появление структурных единиц NB_3. Образование фрагментов CNX (где X может быть кремнием или бором) и распределение участков SiN_xC_{4-x} (где x = 1–4) происходят в результате депротонирования азотсодержащих участков. Это приводит к достижению равномерного распределения атомов бора в фазе SiBCN, что, в свою очередь, обеспечивает высокую термическую стабильность [16].

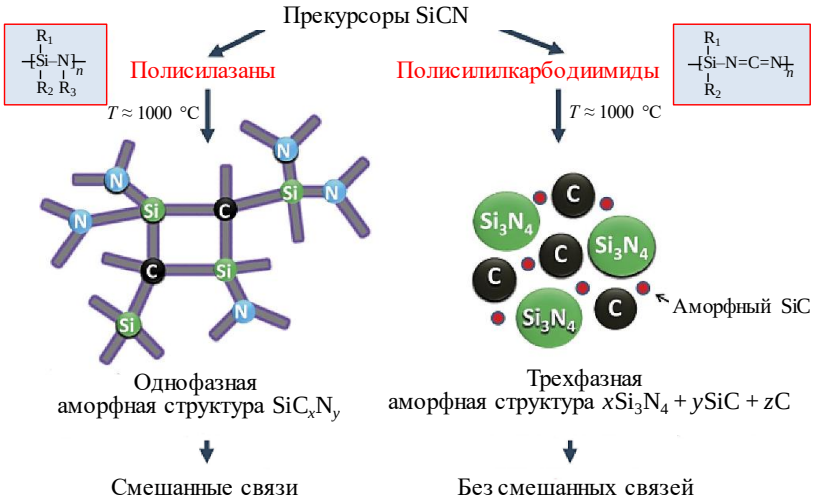


Рис. 4. Микроструктура аморфной керамики SiCN, полученной из полисилазанов и полисилилкарбодиимидов [17]

Дифракция рентгеновских лучей

С помощью уточнения рентгенограмм по методу Ритвельда и аппроксимации формы частиц можно установить размеры кластеров α- и β-SiC, SiO_2 и Si_3N_4. Предел обнаружения кластеров данным методом составляет 1–2 % (объемн.) и не позволяет выявить первые нанокристаллы.

Однако исследования методом дифракции рентгеновских лучей позволяют определить два основных параметра углеродной фазы – плоскостной размер (L_a) и толщину кристаллитов (L_c), а также оценить степень упаковки (стэкинга) для различных типов углеродных фаз [18].

Просвечивающая электронная микроскопия

Изучение трансформаций микроструктуры в керамических материалах на основе SiCO и SiCN активно ведется на протяжении многих лет [19–23]. Анализ изображений, полученных методом просвечивающей электронной микроскопии, не выявил существенных различий между образцами, синтезированными из одного и того же исходного соединения. Дифракция электронов демонстрирует изменения в ближнем порядке, зависящие от состава и температуры термообработки (рис. 5) [24]. В большинстве PDC-систем наблюдается избыток углерода, который при низких температурах равномерно распределен в матрице твердого раствора. Однако при температурах >1000 °C углерод трансформируется, образуя структурные единицы или области с повышенным содержанием турбостратного графита [25, 26].

После обжига SiCO-керамики при 1000 и 1200 °C распределение атомов остается однородным, но при повышении температуры до 1450 °C однородность углерода нарушается на наноуровне (рис. 6). Наноструктурную организацию SiCO-керамики с высоким содержанием углерода можно описать как перколяционную сеть с доменами SiO_2 и локально образованным карбидом кремния.

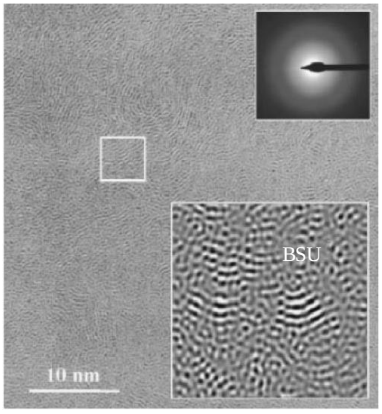


Рис. 5. SiCO-керамика, подвергнутая пиролизу при температуре 1200 °С. На изображении, полученном методом просвечивающей электронной микроскопии, наблюдаются базовые структурные единицы (Basic Structural Unit (BSU)), равномерно распределенные в аморфной матрице [24]

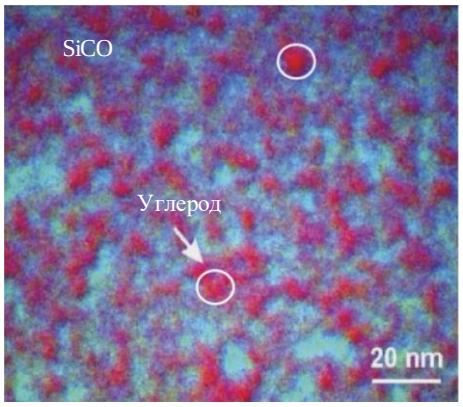


Рис. 6. Изображение, полученное методом энергофильтрующей просвечивающей электронной микроскопии, для обогащенной углеродом SiCO-керамики, подвергнутой пиролизу при температуре 1450 °С [25]

Методы малоуглового рентгеновского и нейтронного рассеяния

В 2005 г. авторы работы [27] с помощью комбинации методов дифракции Брэгга, малоуглового рентгеновского рассеяния и просвечивающей электронной микроскопии охарактеризовали нанодомены и нанокристаллы в системах SiCN и SiCN–ZrO_2, а год спустя предложили простую, но эффективную для прогнозирования размеров доменов в оксикарбидах кремния геометрическую модель.

Впоследствии установлено, что аморфная керамика SiCO может быть протравлена фтороводородной кислотой, в результате чего образуются поры со средним диаметром ~3 нм.

Проведен анализ высокоуглеродистых керамических материалов SiCN с использованием метода малоуглового рентгеновского рассеяния, в частности полученных из полиметилфенилсилилкарбодиимида, который позволил разработать детальную модель температурной эволюции нанодоменов, состоящих из свободного углерода, карбида и нитрида кремния. Результаты показали, что избыток углерода в составе SiCN-керамики оказывает определяющее влияние на формирование нанодоменной структуры, что подчеркивает важность углерода как ключевого компонента в процессах формирования свойств керамических материалов.

Теоретическое моделирование

В работе [28] проведен анализ экспериментальных данных, полученных с помощью малоуглового нейтронного и рентгеновского рассеяния, с применением метода Монте-Карло. Исследование [29] посвящено классическому моделированию молекулярной динамики с использованием эмпирического потенциала Терсоффа. Автор работы [30] осуществил *ab initio* квантовое моделирование, опираясь на теорию функционала плотности и принимая во внимание жесткое связывание.

Кроме того, авторы работы [31] провели классическое моделирование SiCN-керамики на основе молекулярной динамики с помощью потенциала Терсоффа на наноуровне.

В 2004 г. опубликованы результаты важных исследований аморфных керамик. Авторы работы [32] предложили термодинамическую модель, объясняющую повышенную

кристаллизационную устойчивость аморфной SiCN-керамики. Одновременно автор работ [33, 34] представил алгоритм для генерации случайных сетевых структур с заданным химическим порядком, который использован для моделирования полимерных керамик методом молекулярной динамики *ab initio*. Цель моделирования – изучение влияния энтропии на сегрегацию и кристаллизацию, а также на поведение свободного углерода при термическом разложении.

Области применения PDC-материалов

Благодаря различным методам переработки и свойствам PDC-материалы нашли применение в различных сферах: транспорте, оборонной промышленности, энергетике, микро- и наноэлектромеханических системах.

Волокна

Керамические волокна – первое и наиболее успешное коммерческое применение предкерамических полимеров, что открыло новые возможности для разработки компонентов для композиционных материалов. Со временем содержание кислорода в таких волокнах удалось снизить с 15 до <0,5 % (по массе) и, соответственно, повысить их термостабильность при сохранении высоких механических характеристик: прочность при разрыве составляет 2,6–3,3 ГПа [34].

Наряду с другими инновациями представлены BN-волокна [35]. Кроме того, созданы SiCN-волокна, содержащие многостенные углеродные нанотрубки. Применение всего 1 % таких нанотрубок позволяет существенно улучшить прочностные характеристики: прочность при разрыве непиролизованных волокон возрастает на 100 %, а пиролизованных – на 50 % [36].

В процессе термообработки поликарбосилана с добавкой алкоксидов титана на воздухе формируется поверхностный слой из нанокристаллов анатаза с высокой фотокаталитической активностью, способствующих быстрому разложению органических соединений и колиформных бактерий под действием ультрафиолетового излучения, что зачастую применяется в процессах очистки воды.

Керамоматричные композиционные материалы

Широкое применение в производстве композитов нашли предкерамические полимеры, которые нередко используются в тандеме с керамическими порошковыми наполнителями. По сравнению с такими технологиями, как химическая инфильтрация из газовой фазы или инфильтрация расплавом, такой подход обладает рядом преимуществ: простота применяемого оборудования; низкие температуры обработки, что снижает риск повреждения изделия; сокращение продолжительности цикла; возможность изготовления деталей со сложной геометрической формой [37].

Дополнительным направлением применения таких материалов стало создание элементов высокоэффективных тормозных систем для различного вида транспорта. Масса тормозных роторов из поликарбосилана с карбидом кремния в качестве наполнителя и армирующими углеродными волокнами на 60–70 % меньше по сравнению с аналогами при сохранении высокого уровня трения и малого износа.

Высокопористые изделия

Предкерамические полимеры можно модифицировать для получения структуры с заданным размером пор, поэтому они используются для создания высокопористых (>70 % (объемн.)) керамических изделий [38, 39].

Травление с использованием фтороводородной кислоты для SiCO-керамики или газообразного хлора для SiC- и SiCN-керамики позволяет создавать углеродные материалы с большой удельной поверхностью, многочисленными микро- и мезопорами [40]. Пористая керамика на основе предкерамических полимеров применяется при изготовлении теплозащиты, для адсорбции и разделения газов.

Покрытия

Другой интересной областью применения предкерамических полимеров являются защитные покрытия с особыми свойствами.

Введение модифицирующих агентов в состав материалов позволяет контролировать их эксплуатационные характеристики и формировать бездефектный слой увеличенной толщины. Применение умеренных температурных режимов обработки (до 800 °C) снижает риск деградации подложки.

Разработка методов защиты металлических поверхностей от окисления, износа и коррозии представляет значительный научный интерес. Улучшение адгезии к металлу может быть достигнуто за счет реакций на границе раздела в процессе нанесения покрытий. Примером могут служить покрытия для оптоэлектроники с кремниевыми или углеродными кластерами, демонстрирующие повышенную адгезию [41].

Предкерамические полимеры также успешно применяются в качестве связующих для композитов с керамической матрицей. В данном случае наполнители обеспечивают функциональные свойства [42].

Микрокомпоненты

Формование объемных керамических микрокомпонентов как в спеченном, так и в непиролизованном состоянии порошковыми методами обычно не позволяет получить элементы размером <0,1 мм, в то время как при использовании предкерамических полимеров в сочетании с различными литографическими методами достигается разрешение <1 мкм.

Выдающиеся термомеханические, антиокислительные и антикоррозионные свойства позволяют применять керамические микро- и наноэлектромеханические системы в условиях экстремальных температур и в присутствии окислителей, в частности в качестве компонентов электрического нагрева, включая микрозажигалки и свечи накаливания, микродетали и исполнительные механизмы [43].

Другие области применения

Благодаря наличию углерода, способного выступать в качестве проводника для перколяции лития и электронов, карбонитрид кремния является перспективным материалом для анодных компонентов литиевых батарей. Таким образом, SiCN-керамика может одновременно выполнять функции связующего для графита и проводящей добавки [44].

В рамках проекта NOAX (Non-Oxide Adhesive, eXperimental), реализованного консорциумом, в состав которого вошли компании Alliant Techsystems, NASA JSC, GRC, MSFC, LRC и Materials Research and Design, исследована возможность применения предкерамической полимерной композиции. Эта композиция предназначена для последующего превращения в керамику непосредственно в условиях эксплуатации, что позволяет эффективно ремонтировать мелкие дефекты, такие как трещины и выбоины, в армированных углерод-углеродных композитах. Особое внимание уделено их применению на таких критически важных участках, как передняя кромка крыла и носовой обтекатель космического корабля Space Shuttle [42]. Ключевым преимуществом является

возможность проведения ремонтных работ в условиях открытого космоса. Космонавты могут наносить разработанную композицию на поврежденную поверхность во время выхода в космос, после чего она подвергается первичному отверждению. При возвращении космического аппарата материал проходит финальную керамизацию в земной атмосфере при температуре ~1650 °C, демонстрируя высокую стабильность без усадки и образования трещин. Успешное применение предкерамической полимерной композиции для устранения смоделированных повреждений в условиях открытого космоса подтверждено в ходе миссии STS-121.

Силиконовые смолы также испытаны в качестве связующих для тормозных колодок с целью замены традиционных фенольных смол. Керамические тормозные диски работают при значительно более высоких температурах по сравнению с классическими дисками из серого чугуна и отличаются повышенными коэффициентами трения, однако требуют специализированных тормозных колодок, способных выдерживать высокие нагрузки и температуры, возникающие в зоне фрикционного контакта. Колодки на основе полисилоксановых смол имеют высокие фрикционные характеристики.

Оксикарбид кремния в сочетании с различными наполнителями также используется как матричный материал для нагревательных элементов, работающих при температурах до 1300 °C, в частности для свечей накаливания дизельных двигателей [44]. В исследовании [45] предложен способ получения бездефектных объемных изделий на основе жидкого силазанового прекурсора в жертвенных полимерных каркасах, что позволяет наладить производство керамических заготовок для космических зеркал.

Заключения

Анализ научно-технической литературы показывает, что получение PDC-материалов является перспективным направлением современного материаловедения. Их уникальные свойства определяются особенностями микроструктуры, которая формируется в ходе контролируемого пиролиза. Наличие нанодоменов и свободной углеродной фазы обеспечивает высокую термическую стабильность и устойчивость к кристаллизации в условиях повышенных температур.

Основным преимуществом PDC-технологии выступает возможность сочетать методы переработки полимеров с высокими эксплуатационными характеристиками керамики. Это открывает новые перспективы для изготовления изделий сложной геометрической формы, которые трудно или невозможно получить традиционными методами. Особенно важно, что состав и свойства материалов можно точно регулировать на молекулярном уровне за счет модификации прекурсоров и выбора режимов пиролиза.

Дальнейшее развитие PDC-материалов связано с более глубоким изучением механизмов структурных превращений, созданием новых типов предкерамических полимеров и оптимизацией технологических режимов обработки. Особый интерес вызывает разработка многофункциональных материалов, в которых высокая термостойкость сочетается с заданными электрическими, магнитными или оптическими свойствами.

Широкий круг потенциальных областей применения – от аэрокосмической отрасли до энергетики и микроэлектроники – подтверждает значимость данного направления. Дальнейшие исследования в этой области будут способствовать как углублению фундаментальных представлений о процессах структурообразования в керамических материалах, так и созданию новых высокоэффективных материалов для ответственных применений. При этом особое внимание следует уделять внедрению зеленых технологий, а также вопросам утилизации и экологической безопасности [46, 47].

Список источников

1. Кузнецов Б.Ю., Сорокин О.Ю., Ваганова М.Л., Осин И.В. Синтез модельных высокотемпературных керамических матриц методом искрового плазменного спекания и изучение их свойств для получения композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 4 (53). С. 37–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-37-44.
2. Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г., Битюцкая О.Н., Нарский А.Р. Пенокерамические фильтры на основе отечественных огнеупорных материалов. Часть 2 // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). С. 13–22. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-13-22.
3. Варрик Н.М., Максимов В.Г., Юдин А.В., Бабашов В.Г. О критериях пригодности керамических изделий для изготовления оснастки непрерывной разливки алюминия // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). С. 49–56. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 10.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-49-56.
4. Паращенко Н.М., Тупиков А.С., Лыженков З.А., Головко Д.С. Обзор керамических материалов, получаемых из полимеров (PDC). Часть 1. Предкерамические полимеры и производство PDC-материалов // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). С. 134–151. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 15.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-134-151.
5. Паращенко Н.М., Тупиков А.С. Обзор керамических материалов, получаемых из полимеров (PDC). Часть 2. Свойства керамики и влияние наполнителей на них // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 104–120. URL: http://www.viam-works.ru (дата обращения: 15.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-104-120.
6. Riedel R., Passing G., Schönfelder H., Brook R.J. Synthesis of dense silicon-based ceramics at low temperatures // Nature. 1992. Vol. 355. No. 6362. P. 714–717. DOI: 10.1038/355714a0.
7. Mera G., Tamayo A., Nguyen H. et al. Nanodomain Structure of Carbon-Rich Silicon Carbonitride Polymer-Derived Ceramics // Journal of the American Ceramic Society. 2010. Vol. 93. No. 4. P. 1169–1175.
8. Saha A., Raj R., Williamson D.L., Kleebe H.J. Characterization of Nanodomains in Polymer-Derived SiCN Ceramics Employing Multiple Techniques // Journal of the American Ceramic Society. 2005. Vol. 88. No. 1. P. 232–234. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2004.00034.x.
9. Ferrari A.C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects // Solid State Communications. 2007. Vol. 143. No. 1–2. P. 47–57. DOI: 10.1016/j.ssc.2007.03.052.
10. Cançado L.G., Takai K., Enoki T. et al. General equation for the determination of the crystallite size La of nanographite by Raman spectroscopy // Applied Physics Letters. 2006. Vol. 88. No. 16. P. 163106. DOI: 10.1063/1.2196057.
11. Mera G., Riedel R., Poli F., Müller K. Carbon-rich SiCN ceramics derived from phenyl-containing poly(silylcarbodiimides) // Journal of the European Ceramic Society. 2009. Vol. 29. No. 13. P. 2873–2883. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.03.026.
12. Jiang T., Wang Y., Wang Y. et al. Quantitative Raman Analysis of Free Carbon in Polymer-Derived Ceramics // Journal of the American Ceramic Society. 2009. Vol. 92. No. 10. P. 2455–2458. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2009.03233.x.
13. Riedel R., Mera G., Hauser R., Klonczynski A. Silicon-Based Polymer-Derived Ceramics: Synthesis Properties and Applications – A Review: Dedicated to Prof. Dr. Fritz Aldinger on the occasion of his 65th birthday // Nippon Seramikkusu Kyokai gakujutsu ronbunshi. 2006. Vol. 114. No. 1330. P. 425–444. DOI: 10.2109/jcersj.114.425.
14. Iwamoto Y., Völger W., Kroke E. et al. Crystallization Behavior of Amorphous Silicon Carbonitride Ceramics Derived from Organometallic Precursors // Journal of the American Ceramic Society. 2001. Vol. 84. No. 10. P. 2170–2178. DOI: 10.1111/J.1151-2916.2001.TB00983.X.
15. Michelle Morcos R., Mera G., Navrotsky A. et al. Enthalpy of Formation of Carbon-Rich Polymer-Derived Amorphous SiCN Ceramics // Journal of the American Ceramic Society. 2008. Vol. 91. No. 10. P. 3349–3354. DOI: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2021.01.042.
16. Gervais C., Babonneau F., Ruwisch L. et al. Solid-state NMR investigations of the polymer route to SiBCN ceramics // Canadian Journal of Chemistry. 2003. Vol. 81. No. 11. P. 1359–1369. DOI: 10.1139/v03-167.

17. Colombo P., Mera G., Riedel R., Sorarù G.D. Polymer-Derived Ceramics: 40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics // Journal of the American Ceramic Society. 2010. Vol. 93. No. 7. P. 1805–1837. DOI: 10.1002/9783527631940.ch57.
18. Dasgupta K., Sathiyamoorthy D. Disordered carbon – its preparation, structure, and characterisation // Materials Science and Technology. 2003. Vol. 19. No. 8. P. 995–1002. DOI: 10.1179/026708303225004693.
19. Wan J., Gasch M.J., Mukherjee A.K. Silicon Nitride–Silicon Carbide Nancocomposites Fabricated by Electric-Field-Assisted Sintering // Journal of the American Ceramic Society. 2003. Vol. 86. No. 3. P. 526–528. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2003.tb03335.x.
20. Riedel R., Kienzle A., Dressler W. et al. A silicoboron carbonitride ceramic stable to 2,000°C // Nature. 1996. Vol. 382. No. 6594. P. 796–798. DOI: 10.1038/382796a0.
21. Riedel R., Kleebe H.-J., Schönfelder H., Aldinger F. A covalent micro/nano-composite resistant to high-temperature oxidation // Nature. 1995. Vol. 374. No. 6522. P. 526–528. DOI: 10.1038/374526a0.
22. Rouxel T., Soraru G., Vicens J. Creep Viscosity and Stress Relaxation of Gel-Derived Silicon Oxycarbide Glasses // Journal of the American Ceramic Society. 2001. Vol. 84. No. 5. P. 1052–1058. DOI: 10.1111/J.1151-2916.2001.TB00789.X.
23. Raj R., An L., Shah S. et al. Oxidation Kinetics of an Amorphous Silicon Carbonitride Ceramic // Journal of the American Ceramic Society. 2001. Vol. 84. No. 8. P. 1803–1810. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2001.tb00918.x.
24. Störmer H., Kleebe H.-J., Ziegler G. Metastable SiCN glass matrices studied by energy-filtered electron diffraction pattern analysis // Journal of Non-Crystalline Solids. 2007. Vol. 353. No. 30–31. P. 2867–2877. DOI: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2009.03.026.
25. Kroke E., Li Y.-L., Konetschny C. et al. Silazane derived ceramics and related materials // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2000. Vol. 26. No. 4–6. P. 97–199. DOI: 10.1016/S0927-796X(00)00008-5.
26. Kleebe H.-J., Gregori G., Babonneau F. et al. Evolution of C-rich SiOC ceramics: Part I. Characterization by integral spectroscopic techniques: Solid-state NMR and Raman spectroscopy // International Journal of Materials Research. 2022. Vol. 97: Evolution of C-rich SiOC ceramics. No. 6. P. 699–709. DOI: 10.3139/ijmr-2006-0115.
27. Saha A., Raj R., Williamson D.L. A Model for the Nanodomains in Polymer-Derived SiCO // Journal of the American Ceramic Society. 2006. Vol. 89. No. 7. P. 2188–2195. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2006.00920.x.
28. Dürr J., Lamparter P., Bill J. et al. An X-ray and neutron scattering investigation of precursor derived $Si_{24}C_{43}N_{33}$ ceramics // Journal of Non-Crystalline Solids. 1998. Vol. 232–234. P. 155–161.
29. Matsunaga K., Iwamoto Y., Fisher C.A.J., Matsubara H. Molecular Dynamics Study of Atomic Structures in Amorphous Si–C–N Ceramics // Journal of the Ceramic Society of Japan. 1999. Vol. 107. No. 1251. P. 1025–1031. DOI: 10.2109/JCERSJ.107.1025.
30. Amkreutz M. On the Existence of Voids Within Precursor-derived Amorphous Si–C–N Ceramics // Soft Materials. 2007. Vol. 4. No. 2–4. P. 187–205. DOI: 10.1080/15394450701310046.
31. Resta N., Kohler C., Trebin H. Molecular Dynamics Simulations of Amorphous Si–C–N Ceramics: Composition Dependence of the Atomic Structure // Journal of the American Ceramic Society. 2003. Vol. 86: Molecular Dynamics Simulations of Amorphous Si–C–N Ceramics. No. 8. P. 1409–1414. DOI: 10.1016/J.JNONCRYSOL.2016.05.024.
32. Golczewski J.A., Aldinger F. Thermodynamic modeling of amorphous Si–C–N ceramics derived from polymer precursors // Journal of Non-Crystalline Solids. 2004. Vol. 347. No. 1–3. P. 204–210. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2004.08.241.
33. Kroll P. Modelling polymer-derived ceramics // Journal of the European Ceramic Society. 2005. Vol. 25. No. 2–3. P. 163–174.
34. Kroll P. Modeling the «free carbon» phase in amorphous silicon oxycarbide // Journal of Non-Crystalline Solids. 2005. Vol. 351. No. 12–13. P. 1121–1126. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2005.01.010.

35. Krenkel W. Ceramic matrix composites: fiber reinforced ceramics and their applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 418 p. DOI: 10.1002/9783527622412.
36. Cornu D., Bernard S., Duperrier S. et al. Alkylaminoborazine-based precursors for the preparation of boron nitride fibers by the polymer-derived ceramics (PDCs) route // Journal of the European Ceramic Society. 2005. Vol. 25. No. 2–3. P. 111–121. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.07.016.
37. Kokott S., Heymann L., Motz G. Rheology and processability of multi-walled carbon nanotubes – ABSE polycarbosilazane composites // Journal of the European Ceramic Society. 2008. Vol. 28. No. 5. P. 1015–1021. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.09.035.
38. Ishikawa T. Photocatalytic Fiber with Gradient Surface Structure Produced from a Polycarbosilane and Its Applications // International Journal of Applied Ceramic Technology. 2004. Vol. 1. No. 1. P. 49–55. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2004.tb00154.x.
39. Colombo P. Engineering porosity in polymer-derived ceramics // Journal of the European Ceramic Society. 2008. Vol. 28. No. 7. P. 1389–1395. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.12.002.
40. Yeon S.-H., Reddington P., Gogotsi Y. et al. Carbide-derived-carbons with hierarchical porosity from a preceramic polymer // Carbon. 2010. Vol. 48. No. 1. P. 201–210. DOI: 10.1016/j.carbon.2009.09.004.
41. Torrey J.D., Bordia R.K. Processing of Polymer-Derived Ceramic Composite Coatings on Steel // Journal of the American Ceramic Society. 2008. Vol. 91. No. 1. P. 41–45. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2007.02019.x.
42. Lewinsohn C.A., Elangovan S. Development of Amorphous, Non-Oxide Seals for Solid Oxide Fuel Cells // Ceramic Engineering and Science Proceedings / eds. W.M. Kriven, H.-T. Lin. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003. P. 317–322. DOI: 10.1002/9780470294802.ch48.
43. Colombo P. Polymer derived ceramics: from nano-structure to applications. Lancaster: DEStech Publications, 2010. 476 p.
44. Liew L.-A., Liu Y., Luo R. et al. Fabrication of SiCN MEMS by photopolymerization of preceramic polymer // Sensors and Actuators A: Physical. 2002. Vol. 95. No. 2–3. P. 120–134.
45. Kolb R., Fasel C., Liebau-Kunzmann V., Riedel R. SiCN/C-ceramic composite as anode material for lithium ion batteries // Journal of the European Ceramic Society. 2006. Vol. 26. No. 16. P. 3903–3908. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.01.009.
46. Ceramic electric resistor: pat. US5961888A; appl. 10.08.98; publ. 05.10.99.
47. Stern E., Heyder M., Scheffler F. Micropatterned Ceramic Surfaces by Coating with Filled Preceramic Polymers // Journal of the American Ceramic Society. 2009. Vol. 92. No. 10. P. 2438–2442. DOI: 10.1111/J.1551-2916.2009.03228.X.

References

1. Kuznetsov B.Yu., Sorokin O.Yu., Vaganova M.L., Osin I.V. Synthesis of model high-temperature ceramic matrices by the method of spark plasma sintering and the study of their properties for the production of composite materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 37–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-37-44.
2. Deynega G.I., Kuzmina I.G., Bityutskaya O.N., Narsky A.R. Foam ceramic filters based on domestic refractory materials. Part 2. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), pp. 13–22. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: April 10, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-13-22.
3. Varrik N.M., Maksimov V.G., Yudin A.V., Babashov V.G. On the criteria of suitability of ceramic products for the manufacture of equipment for continuous casting of aluminum. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), pp. 49–56. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: April 10, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-49-56.
4. Parashchenko N.M., Tupikov A.S., Lyzhenkov Z.A., Golovko D.S. Review of Polymer-Derived Ceramics (PDC). Part 1. Preceramic polymers and production of PDC materials. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), pp. 134–151. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: May 15, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-134-151.
5. Parashchenko N.M., Tupikov A.S., Lyzhenkov Z.A., Golovko D.S. Review of Polymer-Derived Ceramics (PDC). Part 1. Preceramic polymers and production of PDC materials. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), pp. 134–151. Available at: http://www.viam-works.ru (accessed: May 15, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-104-120.

6. Riedel R., Passing G., Schönfelder H., Brook R.J. Synthesis of dense silicon-based ceramics at low temperatures. *Nature*, 1992, vol. 355, no. 6362, pp. 714–717. DOI: 10.1038/355714a0.
7. Mera G., Tamayo A., Nguyen H. et al. Nanodomain Structure of Carbon-Rich Silicon Carbonitride Polymer-Derived Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, vol. 93, no. 4, pp. 1169–1175.
8. Saha A., Raj R., Williamson D.L., Kleebe H.J. Characterization of Nanodomains in Polymer-Derived SiCN Ceramics Employing Multiple Techniques. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, vol. 88, no. 1, pp. 232–234. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2004.00034.x.
9. Ferrari A.C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects. *Solid State Communications*, 2007, vol. 143, no. 1–2, pp. 47–57. DOI: 10.1016/j.ssc.2007.03.052.
10. Cançado L.G., Takai K., Enoki T. et al. General equation for the determination of the crystallite size La of nanographite by Raman spectroscopy. *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 88, no. 16, p. 163106. DOI: 10.1063/1.2196057.
11. Mera G., Riedel R., Poli F., Müller K. Carbon-rich SiCN ceramics derived from phenyl-containing poly(silylcarbodiimides). *Journal of the European Ceramic Society*, 2009, vol. 29, no. 13, pp. 2873–2883. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2009.03.026.
12. Jiang T., Wang Y., Wang Y. et al. Quantitative Raman Analysis of Free Carbon in Polymer-Derived Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2009, vol. 92, no. 10, pp. 2455–2458. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2009.03233.x.
13. Riedel R., Mera G., Hauser R., Klonczynski A. Silicon-Based Polymer-Derived Ceramics: Synthesis Properties and Applications – A Review: Dedicated to Prof. Dr. Fritz Aldinger on the occasion of his 65th birthday. *Nippon Seramikkusu Kyokai gakujutsu ronbunshi*, 2006, vol. 114, no. 1330, pp. 425–444. DOI: 10.2109/jcersj.114.425.
14. Iwamoto Y., Völger W., Kroke E. et al. Crystallization Behavior of Amorphous Silicon Carbonitride Ceramics Derived from Organometallic Precursors. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, vol. 84, no. 10, pp. 2170–2178. DOI: 10.1111/J.1151-2916.2001.TB00983.X.
15. Michelle Morcos R., Mera G., Navrotsky A. et al. Enthalpy of Formation of Carbon-Rich Polymer-Derived Amorphous SiCN Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, vol. 91, no. 10, pp. 3349–3354. DOI: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2021.01.042.
16. Gervais C., Babonneau F., Ruwisch L. et al. Solid-state NMR investigations of the polymer route to SiBCN ceramics. *Canadian Journal of Chemistry*, 2003, vol. 81, no. 11, pp. 1359–1369. DOI: 10.1139/v03-167.
17. Colombo P., Mera G., Riedel R., Sorarù G.D. Polymer-Derived Ceramics: 40 Years of Research and Innovation in Advanced Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, vol. 93, no. 7, pp. 1805–1837. DOI: 10.1002/9783527631940.ch57.
18. Dasgupta K., Sathiyamoorthy D. Disordered carbon – its preparation, structure, and characterisation. *Materials Science and Technology*, 2003, vol. 19, no. 8, pp. 995–1002. DOI: 10.1179/026708303225004693.
19. Wan J., Gasch M.J., Mukherjee A.K. Silicon Nitride–Silicon Carbide Nancocomposites Fabricated by Electric-Field-Assisted Sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 2003, vol. 86, no. 3, pp. 526–528. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2003.tb03335.x.
20. Riedel R., Kienzle A., Dressler W. et al. A silicoboron carbonitride ceramic stable to 2,000°C. *Nature*, 1996, vol. 382, no. 6594, pp. 796–798. DOI: 10.1038/382796a0.
21. Riedel R., Kleebe H.-J., Schönfelder H., Aldinger F. A covalent micro/nano-composite resistant to high-temperature oxidation. *Nature*, 1995, vol. 374, no. 6522, pp. 526–528. DOI: 10.1038/374526a0.
22. Rouxel T., Soraru G., Vicens J. Creep Viscosity and Stress Relaxation of Gel-Derived Silicon Oxycarbide Glasses. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, vol. 84, no. 5, pp. 1052–1058. DOI: 10.1111/J.1151-2916.2001.TB00789.X.
23. Raj R., An L., Shah S. et al. Oxidation Kinetics of an Amorphous Silicon Carbonitride Ceramic. *Journal of the American Ceramic Society*, 2001, vol. 84, no. 8, pp. 1803–1810. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2001.tb00918.x.

24. Störmer H., Kleebe H.-J., Ziegler G. Metastable SiCN glass matrices studied by energy-filtered electron diffraction pattern analysis. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, vol. 353, no. 30–31, pp. 2867–2877. DOI: 10.1016/J.JEURCERAMSOC.2009.03.026.
25. Kroke E., Li Y.-L., Konetschny C. et al. Silazane derived ceramics and related materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2000, vol. 26, no. 4–6, pp. 97–199. DOI: 10.1016/S0927-796X(00)00008-5.
26. Kleebe H.-J., Gregori G., Babonneau F. et al. Evolution of C-rich SiOC ceramics: Part I. Characterization by integral spectroscopic techniques: Solid-state NMR and Raman spectroscopy. *International Journal of Materials Research*, 2022, vol. 97: Evolution of C-rich SiOC ceramics, no. 6, pp. 699–709. DOI: 10.3139/ijmr-2006-0115.
27. Saha A., Raj R., Williamson D.L. A Model for the Nanodomains in Polymer-Derived SiCO. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, vol. 89, no. 7, pp. 2188–2195. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2006.00920.x.
28. Dürr J., Lamparter P., Bill J. et al. An X-ray and neutron scattering investigation of precursor derived $Si_{24}C_{43}N_{33}$ ceramics. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1998, vol. 232–234, pp. 155–161.
29. Matsunaga K., Iwamoto Y., Fisher C.A.J., Matsubara H. Molecular Dynamics Study of Atomic Structures in Amorphous Si–C–N Ceramics. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 1999, vol. 107, no. 1251, pp. 1025–1031. DOI: 10.2109/JCERSJ.107.1025.
30. Amkreutz M. On the Existence of Voids Within Precursor-derived Amorphous Si–C–N Ceramics. *Soft Materials*, 2007, vol. 4, no. 2–4, pp. 187–205. DOI: 10.1080/15394450701310046.
31. Resta N., Kohler C., Trebin H. Molecular Dynamics Simulations of Amorphous Si–C–N Ceramics: Composition Dependence of the Atomic Structure. *Journal of the American Ceramic Society*, 2003, vol. 86: Molecular Dynamics Simulations of Amorphous Si–C–N Ceramics, no. 8, pp. 1409–1414. DOI: 10.1016/J.JNONCRYSOL.2016.05.024.
32. Golczewski J.A., Aldinger F. Thermodynamic modeling of amorphous Si–C–N ceramics derived from polymer precursors. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2004, vol. 347, no. 1–3, pp. 204–210. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2004.08.241.
33. Kroll P. Modelling polymer-derived ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, vol. 25, no. 2–3, pp. 163–174.
34. Kroll P. Modeling the «free carbon» phase in amorphous silicon oxycarbide. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2005, vol. 351, no. 12–13, pp. 1121–1126. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2005.01.010.
35. Krenkel W. *Ceramic matrix composites: fiber reinforced ceramics and their applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2008, 418 p. DOI: 10.1002/9783527622412.
36. Cornu D., Bernard S., Duperrier S. et al. Alkylaminoborazine-based precursors for the preparation of boron nitride fibers by the polymer-derived ceramics (PDCs) route. *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, vol. 25, no. 2–3, pp. 111–121. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2004.07.016.
37. Kokott S., Heymann L., Motz G. Rheology and processability of multi-walled carbon nanotubes – ABSE polycarbosilazane composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, vol. 28, no. 5, pp. 1015–1021. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.09.035.
38. Ishikawa T. Photocatalytic Fiber with Gradient Surface Structure Produced from a Polycarbosilane and Its Applications. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2004, vol. 1, no. 1, pp. 49–55. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2004.tb00154.x.
39. Colombo P. Engineering porosity in polymer-derived ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2008, vol. 28, no. 7, pp. 1389–1395. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.12.002.
40. Yeon S.-H., Reddington P., Gogotsi Y. et al. Carbide-derived-carbons with hierarchical porosity from a preceramic polymer. *Carbon*, 2010, vol. 48, no. 1, pp. 201–210. DOI: 10.1016/j.carbon.2009.09.004.
41. Torrey J.D., Bordia R.K. Processing of Polymer-Derived Ceramic Composite Coatings on Steel. *Journal of the American Ceramic Society*, 2008, vol. 91, no. 1, pp. 41–45. DOI: 10.1111/j.1551-2916.2007.02019.x.

42. Lewinsohn C.A., Elangovan S. Development of Amorphous, Non-Oxide Seals for Solid Oxide Fuel Cells. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*. Eds. W.M. Kriven, H.-T. Lin. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 317–322. DOI: 10.1002/9780470294802.ch48.
43. Colombo P. *Polymer derived ceramics: from nano-structure to applications*. Lancaster: DEStech Publications, 2010, 476 p.
44. Liew L.-A., Liu Y., Luo R. et al. Fabrication of SiCN MEMS by photopolymerization of preceramic polymer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, vol. 95, no. 2–3, pp. 120–134.
45. Kolb R., Fasel C., Liebau-Kunzmann V., Riedel R. SiCN/C-ceramic composite as anode material for lithium ion batteries. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006, vol. 26, no. 16, pp. 3903–3908. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.01.009.
46. *Ceramic electric resistor*: pat. US5961888A; appl. 10.08.98; publ. 05.10.99.
47. Stern E., Heyder M., Scheffler F. Micropatterned Ceramic Surfaces by Coating with Filled Preceramic Polymers. *Journal of the American Ceramic Society*, 2009, vol. 92, no. 10, pp. 2438–2442. DOI: 10.1111/J.1551-2916.2009.03228.X.

Информация об авторах

Паращенко Никита Макарович, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru
Кожухаров Максим Сергеевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Nikita M. Parashchenko, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru
Maksim S. Kozhukharov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 08.07.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 04.08.2026.
The article was submitted 08.07.2026; approved and accepted for publication after reviewing 04.08.2026.