

Научная статья

УДК 666.7

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-134-144

ЖИДКОФАЗНОЕ СПЕКАНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ Si_3N_4 С КОМПЛЕКСНЫМИ ОКСИДНЫМИ ДОБАВКАМИ

В.В. Холодова¹, Д.И. Вершинин¹, Н.Е. Щеголева¹

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

Аннотация. Исследовано влияние состава и концентрации спекающих добавок на процесс спекания, формируемую микроструктуру и физико-механические свойства керамики на основе нитрида кремния. Установлено, что повышение концентрации комплексов добавок с 5 до 15 % (по массе) способствует увеличению средней плотности и уровня физико-механических свойств керамики на основе Si_3N_4 . В ходе спекания наблюдается полное превращение $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ в $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ с образованием вытянутых кристаллов. Характер спекания и формируемая микроструктура в значительной степени зависят от состава и свойств расплава добавок.

Ключевые слова: нитрид кремния, жидкофазное спекание, спекающие добавки, активация спекания, свободное спекание, уплотнение

Для цитирования: Холодова В.В., Вершинин Д.И., Щеголева Н.Е. Жидкофазное спекание керамики на основе Si_3N_4 с комплексными оксидными добавками // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 134–144. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-134-144.

Scientific article

LIQUID-PHASE SINTERING OF CERAMICS BASED ON Si_3N_4 WITH COMPLEX OXIDE ADDITIVES

V.V. Kholodova¹, D.I. Vershinin¹, N.E. Shchegoleva¹

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

Abstract. The study investigates the influence of sintering additive concentrations on sintering process, resulting microstructure, physical and mechanical properties of silicon nitride based ceramics. It has been established that increasing the concentration of additive complexes from 5 to 15 wt. % increases the average density and the level of physical and mechanical properties of Si_3N_4 based ceramics. During sintering, complete transformation of $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ into $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ is observed with formation of elongated crystals. The nature of sintering process and formed microstructure are largely depend on the composition and properties of the molten additives.

Keywords: silicon nitride, liquid-phase sintering, sintering additives, activation of sintering, free sintering, high densification

For citation: Kholodova V.V., Vershinin D.I., Shchegoleva N.E. Liquid-phase sintering of ceramics based on Si_3N_4 with complex oxide additives. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 134–144. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-134-144.

Введение

В машиностроении, электронной и авиационной промышленности наблюдается высокий спрос на конструкционные материалы, которые обладают повышенной эффективностью, надежностью, длительным сроком службы, а также устойчивостью и стабильностью физико-механических свойств при различных условиях эксплуатации. В качестве альтернативы металлам и сплавам в последние годы широко рассматривается и изучается бескислородная керамика, которая способна длительно служить в конструкциях при температурах $>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1–12].

Перечисленным требованиям отвечает керамика на основе нитрида кремния, так как сочетает высокую прочность, твердость, термостойкость и низкую плотность. Однако при всех преимуществах нитрид кремния характеризуется ионно-ковалентным типом связи и, соответственно, низким коэффициентом диффузии, поэтому получение высокоплотной керамики на его основе затруднено [13–15].

Для активации спекания нитрида кремния рассмотрены различные способы: повышение площади удельной поверхности исходного порошка Si_3N_4 [16], спекание под давлением [17–21], введение спекающих добавок [22].

Методы спекания с применением высокого внешнего давления для получения высокоплотной нитридокремниевой керамики являются эффективными, но трудоемкими и затратными, к тому же не позволяют получать изделия сложной формы. Дополнительный помол коммерческих порошков нитрида кремния, удельная поверхность которых зависит от способа их получения, не эффективен, так как не обеспечивает размер частиц $<0,6\text{ }\mu\text{m}$ [23]. При этом мелкодисперсные порошки характеризуются повышенным содержанием кислорода, что в дальнейшем способствует увеличению доли формируемых легкоплавких фаз. Поэтому изучению спекающих добавок уделено наибольшее внимание в научно-технической литературе.

При использовании добавок спекание нитрида кремния происходит по жидкофазному механизму. При температуре $\sim 1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ в расплаве осуществляется необратимый переход нитрида кремния из α -модификации в β -модификацию [24]. Наиболее вероятно, что процесс перехода осуществляется путем растворения частиц нитрида кремния в расплаве спекающих добавок с последующей кристаллизацией. Следует отметить, что при кристаллизации β - Si_3N_4 форма кристаллов может различаться в значительной степени – от изометрической до игольчатой. В последнем случае наблюдается самоармирование материала. Сообщается [12, 24, 25], что степень превращения $\alpha \rightarrow \beta$ и морфология кристаллов β - Si_3N_4 в большой степени зависят от температурно-временных условий процесса термообработки, состава и свойств расплава спекающих добавок. В свою очередь высокая вязкость расплава и его малое количество способствуют формированию частиц с большим соотношением размеров сторон [24]. При этом имеется информация, что снижение вязкости расплава способствует переходу $\alpha \rightarrow \beta$ [26]. На поздних стадиях спекания происходит рост кристаллов нитрида кремния. При охлаждении расплав застывает и формирует либо стеклофазу, либо вторичные кристаллические фазы.

Изучено влияние спекающих добавок, как оксидных [27–29], в том числе оксидов редкоземельных элементов [30, 31], так и неоксидных [26, 32, 33], которые позволяют получать керамику на основе нитрида кремния высокой плотности. Однако следует также обратить внимание на образование аморфных фаз на границах кристаллов и формируемую микроструктуру керамики, что в дальнейшем влияет на физико-механические свойства.

Таким образом, для достижения высокого уровня свойств керамики на основе нитрида кремния следует учитывать взаимосвязи и взаимовлияние в системе «состав–

структура–свойство–технология» и использовать высокодисперсные исходные порошки. При подборе спекающих добавок и их концентрации следует учитывать, что их применение во многом определяет уровень свойств керамики, так как, помимо активации спекания и растворения-кристаллизации нитрида кремния, приводит к формированию микроструктуры с межзеренными прослойками вторичных фаз, которые ускоряют пластическую деформацию в материалах при повышенных температурах [14, 34]. Поэтому все свойства нитридокремниевых материалов, особенно при повышенных температурах, в значительной степени зависят от вида используемых спекающих добавок, их концентрации, конечного фазового состава керамики и микроструктуры, формируемой в ходе спекания. С точки зрения технологии при подборе режима обжига необходимо учитывать температуру образования расплава жидкой фазы, его состав и свойства, а также принимать меры для снижения или предотвращения диссоциации нитрида кремния при температурах >1600 °С.

Цель работы – изучение влияния спекающих добавок и их концентрации на спекание, физико-механические свойства и микроструктуру керамики на основе Si_3N_4 .

Материалы и методы

В данной работе использовали порошок нитрида кремния с размером частиц $d_{50} = 0,93$ мкм, по результатам рентгенофазового анализа (РФА) содержание α - и β - Si_3N_4 составляет 92,6 и 7,4 % соответственно (рис. 1).

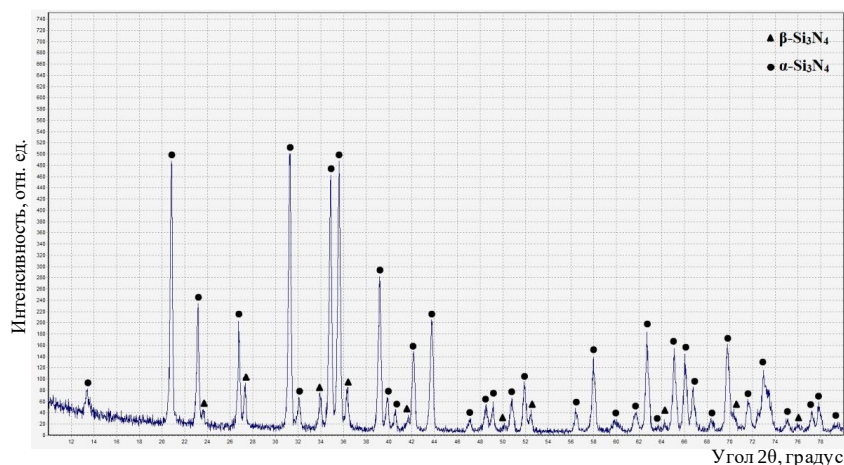


Рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа исходного порошка Si_3N_4

В качестве активаторов спекания керамики на основе нитрида кремния для состава 1 использовали порошки оксида магния и оксида алюминия, для состава 2 дополнительно вводили микронные и наноразмерные порошки ряда модифицирующих добавок. Смеси получали путем смешивания исходных порошков нитрида кремния и добавок с учетом стехиометрии в валковой мельнице по мокрому способу. Концентрация добавок при этом составила 5, 10 и 15 % (здесь и далее – % (по массе)). Полученные суспензии высушивали, затем проводили дезагрегацию через сито № 007. Для дальнейшего формования вводили временную технологическую связку, образцы прессовали в виде балок размером $80 \times 50 \times 50$ мм при одинаковом давлении. Отформованные образцы обжигали методом свободного спекания при температуре 1750 °С в потоке азота.

Для оценки структурных и физико-механических свойств керамических образцов рассчитывали относительную линейную усадку $\Delta l/l$, определяли среднюю плотность $\rho_{\text{ср}}$ и открытую пористость Π_0 методом гидростатического взвешивания, а также

оценивали физико-механические свойства, а именно: предел прочности при четырехточечном изгибе $\sigma_{изг}$ и микротвердость по методу Виккерса HV. Кроме того, изучили фазовый состав керамики с помощью РФА, микроструктуру – методом сканирующей электронной микроскопии.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты

На рис. 2, а представлены зависимости относительной линейной усадки $\Delta l/l$ от концентрации комплекса спекающих добавок. Согласно полученным результатам, для керамики обоих составов наблюдается схожая тенденция – с увеличением концентрации спекающих добавок с 5 до 15 % усадка возрастает: для состава 1 – с 13,0 до 15,0 %, для состава 2 – с 10,0 до 16,2 %, и достигает максимального значения.

На рис. 2, б, в представлены результаты определения средней плотности и открытой пористости. С увеличением концентрации добавок с 5 до 15 % плотность керамики обоих составов возрастает. При этом для состава 1 плотность увеличивается с 2,45 до 2,95 г/см³, для состава 2 – с 2,24 до 2,98 г/см³. При концентрации спекающих добавок 15 % плотность достигает максимального значения. С увеличением концентрации комплекса добавок открытая пористость в обоих случаях закономерно уменьшается, однако для состава 1 при содержании 15 % пористость достигает наименьшего значения, составляющего 1,2 %. Для состава 2 пористость снижается с 29,5 до 1,6 %.

Таким образом, увеличение концентрации спекающих добавок способствует спеканию керамики обоих составов, что обусловлено образованием расплавов и интенсификацией спекания по жидкофазному механизму.

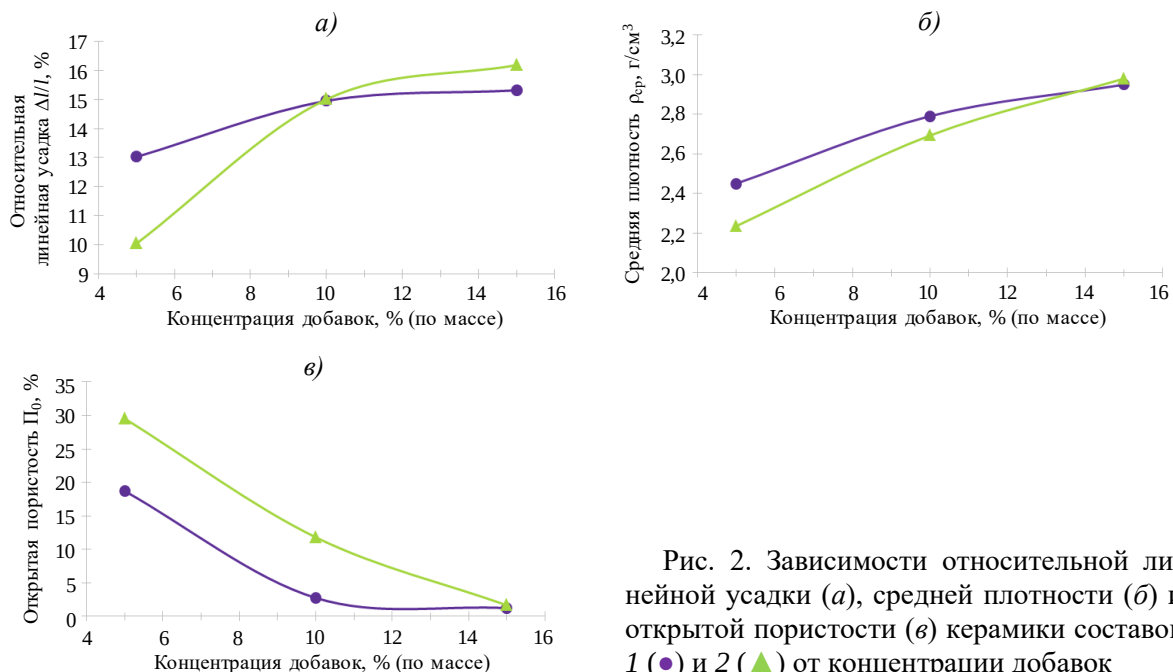


Рис. 2. Зависимости относительной линейной усадки (а), средней плотности (б) и открытой пористости (в) керамики составов 1 (●) и 2 (▲) от концентрации добавок

Предел прочности при четырехточечном изгибе для керамики состава 1 с повышением концентрации добавок с 5 до 10 % возрастает и достигает 313,2 МПа, затем при увеличении концентрации до 15 % уменьшается до 297,5 МПа (рис. 3, а), что, вероятно,

связано с формируемой микроструктурой. Для керамики состава 2 с повышением концентрации добавок наблюдается планомерное увеличение прочности с 148,0 МПа до максимального значения 320,5 МПа, превышающего прочность образца состава 1.

При повышении концентрации спекающих добавок микротвердость образцов обоих составов возрастает (рис. 3, б), при этом для состава 1 значения увеличиваются с 4,9 до 14,0 ГПа, для состава 2 – с 3,8 до 15,4 ГПа, достигая максимального значения при концентрации спекающих добавок 15 %, что согласуется с результатами определения средней плотности.

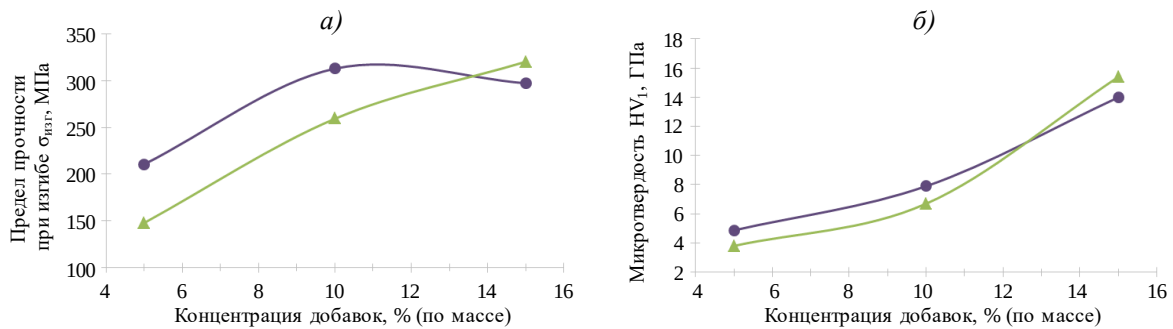


Рис. 3. Зависимости предела прочности при четырехточечном изгибе (а) и микротвердости (б) керамики составов 1 (●) и 2 (▲) от концентрации добавок

На рис. 4 представлены микроструктуры образцов составов 1 и 2 при концентрации добавок 10 и 15 %. Для образцов состава 1 микроструктура (рис. 4, а) представлена зернами изометрической формы, размер которых варьируется от 0,4 до 1,9 мкм. При этом между зернами нитрида кремния наблюдается закристаллизовавшийся расплав спекающих добавок. Следует отметить, что в технологических порах видна игольчатая морфология кристаллов нитрида кремния. С увеличением концентрации добавок до 15 % структура становится более плотной, количество закристаллизовавшегося расплава увеличивается, при этом видна пористость размером от 2,0 до 9,7 мкм (рис. 4, б).

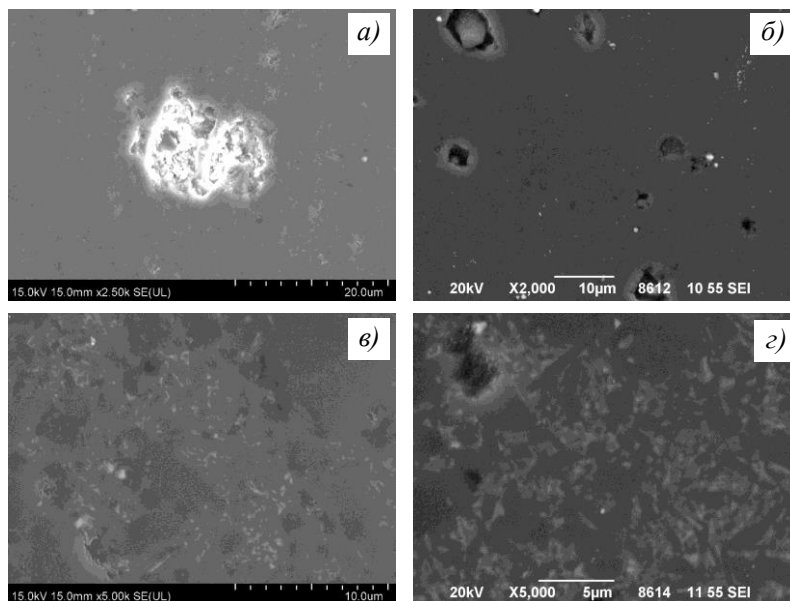


Рис. 4. Результаты сканирующей электронной микроскопии образцов составов 1 (а, б) и 2 (в, г) после обжига при температуре 1750 °С при концентрации добавок 10 (а, в) и 15 % (б, г)

Микроструктура керамики состава 2 с концентрацией добавки 10 % (рис. 4, в) отличается от состава 1, помимо изометрических зерен наблюдается большое количество вытянутых зерен нитрида кремния длиной от 2,0 до 5,9 мкм. При концентрации добавки 15 % размер изометрических зерен возрастает с 6,2 до 9,7 мкм (рис. 4, г), при этом наблюдается большое количество вытянутых зерен длиной до 10,6 мкм. Размер межкристаллических пор не превышает 3,0 мкм.

На рис. 5 представлены результаты РФА образцов керамики после обжига.

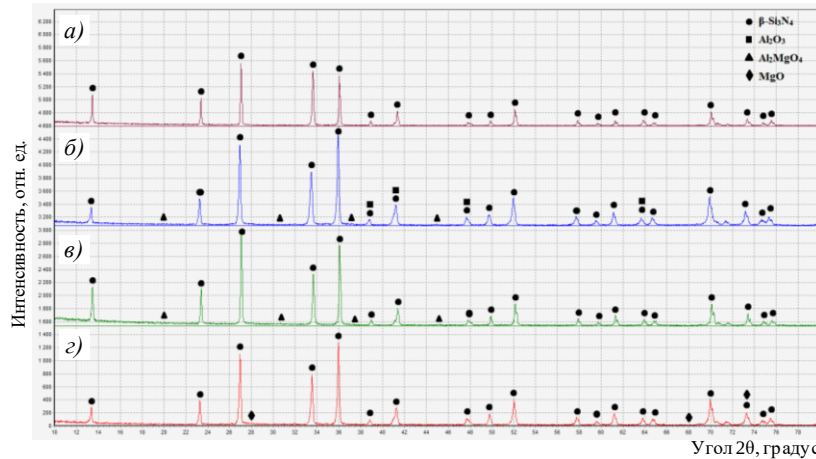


Рис. 5. Результаты рентгенофазового анализа образцов керамики составов 1 (а, б) и 2 (в, г) после обжига при температуре 1750 °С при концентрации добавок 10 (а, в) и 15 % (б, г)

Керамика состава 1 представлена основной фазой β - Si_3N_4 , при этом при концентрации добавки 15 % дополнительно наблюдаются дифракционные пики малой интенсивности, соответствующие остаточному Al_2O_3 и вторичной фазе Al_2MgO_4 в малых количествах. Для керамики состава 2 при концентрации комплекса спекающих добавок 10 % наблюдаются пики фаз β - Si_3N_4 и Al_2MgO_4 . При увеличении концентрации добавки до 15 % дополнительно выявлена только фаза MgO . Отсутствие дифракционных пиков для ряда оксидов комплексных добавок свидетельствует об образовании рентгеноаморфной вторичной фазы во всех образцах керамики.

Обсуждение и заключения

Согласно результатам определения физико-механических свойств, с увеличением концентрации комплекса добавок для керамики обоих составов возрастают относительная линейная усадка, средняя плотность и закономерно уменьшается открытая пористость. При этом наибольшее значение средней плотности $2,98 \text{ г/см}^3$ получено для керамики состава 2 при концентрации добавки 15 %. Следует отметить, что для образца состава 1 плотность отличается незначительно и составляет $2,95 \text{ г/см}^3$, а открытая пористость достигает наименьшего значения среди изученных составов 1,2 %. Увеличение концентрации спекающих добавок способствует спеканию керамики обоих составов, что обусловлено образованием расплавов SiO_2 , находящегося на поверхности частиц нитрида кремния, и оксидов добавок. Это в свою очередь приводит к интенсификации спекания керамики на основе нитрида кремния по жидкофазному механизму. Активность уплотнения при этом связана с составом и свойствами образующихся при термообработке расплавов, в первую очередь с их вязкостью. Спекание нитрида кремния подразумевает уплотнение за счет растворения α - Si_3N_4 в расплаве добавок с последующей кристаллизацией из расплава в виде β - Si_3N_4 , поэтому вязкость расплава влияет на

скорость процесса растворения-кристаллизации и, соответственно, спекания. Менее вязкие расплавы лучше и равномернее распределяются по межзеренным границам при малых концентрациях добавок. Таким образом, при малых концентрациях расплава добавок спекание протекает тем активнее, чем меньше вязкость расплава (при условии близкой или равной смачивающей способности).

Керамика состава 1 в сравнении с керамикой состава 2 спекается активнее при концентрациях добавки 5–10 %. Тем не менее при концентрации 15 % степень уплотнения керамики состава 2 достигает максимума и незначительно превосходит значения для состава 1. Указанный характер зависимости свойств от концентрации добавок свидетельствует о том, что керамика состава 1 спекается активнее ввиду меньшей вязкости расплава добавок.

При изучении микроструктуры выявлено, что для керамики обоих составов процесс активации спекания происходит за счет жидкой фазы, которая образуется при взаимодействии добавок с SiO_2 , находящимся на поверхности частиц нитрида кремния, в дальнейшем расплав насыщается нитридом кремния из твердой фазы и выкристаллизовывается из расплава в виде кристаллов различной формы. Жидкофазный механизм, реализующийся путем растворения-кристаллизации, способствует не только уплотнению, но и фазовому переходу из $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ в $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$. При этом формирующиеся кристаллы $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ образуются в виде вытянутых кристаллов игольчатой формы. Образование таких кристаллов приводит к эффекту самоармирования. Результаты РФА полученных образцов керамики подтверждают превращение $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ в $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$. Следует отметить, что для состава 1 при повышении концентрации добавок до 15 % уменьшается эффект самоармирования, так как образуются зерна изометрической формы в большом количестве, что связано с меньшей вязкостью образуемого расплава. Для состава 2, наоборот, при повышении концентрации добавок наблюдается большее количество кристаллов $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ игольчатой формы, образование которых связано с большей вязкостью расплава и меньшей скоростью перекристаллизации нитрида кремния. Полученная микроструктура позволяет ограничить распространение трещин, что в дальнейшем положительно сказывается как на прочности, так и на ударной вязкости керамики.

Результаты определения предела прочности при четырехточечном изгибе согласуются со значениями средней плотности, открытой пористости и формируемой микроструктурой керамики. Так, для образцов состава 1 наблюдается перегиб на кривой прочности при концентрации добавок 10 %. Несмотря на высокую плотность $2,95 \text{ г/см}^3$, предел прочности при концентрации 15 % снижается до 297,5 МПа, что связано с формированием микроструктуры с меньшей долей вытянутых зерен нитрида кремния. Для керамики состава 2 с повышением концентрации добавок до 15 % за счет достижения высокой плотности и формирования структуры с большей долей вытянутых зерен $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ предел прочности при четырехточечном изгибе повышается и достигает максимального значения (320,5 МПа).

Таким образом, введение комплекса спекающих добавок способствует активации процесса спекания керамики на основе Si_3N_4 , при этом наилучшие свойства получены для состава 2 при концентрации добавок 15 %.

Список источников

1. Klemm H. Silicon nitride for high-temperature applications // Journal of the American Ceramic Society. 2010. Vol. 93. No. 6. P. 1501–1522.
2. Kita H., Hirao K., Hyuga H. et al. Review and overview of silicon nitride and SiAlON, including their applications // Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties. Elsevier Inc., 2013. 1213 p.

3. Hampshire S. Silicon nitride ceramics – review of structure, processing and properties // *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*. 2007. Vol. 24. No. 1. P. 43–50.
4. Tan D.W., Zhu L.L., Wei W.X. et al. Performance improvement of Si_3N_4 ceramic cutting tools by tailoring of phase composition and microstructure // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. No. 16. P. 26182–26189.
5. Nakashima Y., Zhou Y., Tanabe K. et al. Effect of microstructures on dielectric breakdown strength of sintered reaction-bonded silicon nitride ceramics // *Journal of the American Ceramic Society*. 2023. Vol. 106. No. 2. P. 1139–1148.
6. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
7. Громов В.И., Якушева Н.А., Востриков А.В., Черкашнева Н.Н. Высокопрочные конструкционные стали для валов газотурбинных двигателей (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). С. 3–12. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
8. Ерасов В.С., Сибяев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 61–81. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
9. Евдокимов С.А., Щеголева Н.Е., Качаев А.А. Способы соединения керамических композиционных материалов на основе SiC с керамическими и металлическими материалами (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). С. 75–83. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-75-83.
10. Бабинова А.А., Князев А.В., Беляченков И.О., Сорокин О.Ю. Испытания на стойкость керамических материалов к высокотемпературной коррозии при температуре 900 °С // *Авиационные материалы и технологии*. 2025. № 1 (78). С. 99–110. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.02.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-99-110.
11. Беляченков И.О., Щеголева Н.Е., Чайникова А.С., Ваганова М.Л., Шавнев А.А. Влияние спекающих и модифицирующих добавок на процесс спекания и свойства нитридокремневой керамики // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 70–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-70-78.
12. Викулин В.В. Производство изделий на основе Si_3N_4 и их применение в авиационно-космической промышленности // *Перспективные материалы*. 2006. № 5. С. 14–19.
13. Андриевский Р.А., Спивак И.И. Нитрид кремния и материалы на его основе. М.: Металлургия, 1984. 137 с.
14. Косолапов Т.Я., Андреев Т.В., Бартницкая Т.Б. и др. Неметаллические тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1985. 224 с.
15. Kumar A., Gokhale A., Ghose S., Aravindan S. Effect of nano-sized sintering additives on microstructure and mechanical properties of Si_3N_4 ceramics // *Materials Science and Engineering: A*. 2019, vol. 750, pp. 132–140.
16. Перевислов С.Н., Чупов В.Д. Получение высокоплотных материалов на основе ультрадисперсного порошка нитрида кремния // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2010. № 3. С. 17–23.
17. Attia M.A.A., Ewais E.M.M. Hot pressed Si_3N_4 ceramics using $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ as sintering additive for vehicle engine parts // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2020. Vol. 61. No. 4. P. 384–392.
18. Wang W., Pan Y., Zeng Y.P. et al. Effect of sintering aids content and powder characteristics on gas pressure sintered Si_3N_4 ceramics // *Ceramics International*. 2024. Vol. 50. No. 5. P. 8260–8268.
19. Jiang Q.G., Guo W.M., Liu W. et al. Influence of powder characteristics on hot-pressed Si_3N_4 ceramics // *Science of Sintering*. 2017. Vol. 49. No. 1. P. 81–89.
20. Zhao C.C., Kim M.J., Lee J.W. et al. Mechanical properties and stability of Si_3N_4 ceramics treated by hot isostatic pressing // *Ceramics International*. 2025. Vol. 51. No. 24. P. 41474–41481.

21. Santos C., Strecker K., Baldacim S.A. et al. Influence of additive content on the anisotropy in hot-pressed Si_3N_4 ceramics using grain orientation measurements // *Ceramics International*. 2004. Vol. 30. No. 5. P. 653–659.
22. Перевислов С.Н. Механизм жидкофазного спекания карбида и нитрида кремния с оксидными активирующими добавками // *Стекло и керамика*. 2013. Т. 86. № 7. С. 34–38.
23. Перевислов С.Н. Материалы на основе карбида и нитрида кремния с оксидными активирующими добавками для изделий конструкционного назначения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб, 2018. 203 с.
24. Лысенков А.С. Конструкционная керамика на основе нитрида кремния с добавкой алюминатов кальция: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 139 с.
25. Lee H.M., Tatami J., Kim D.K. Microstructural evolution of Si_3N_4 ceramics from starting powders with different α -to- β ratios // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2016. Vol. 124. No. 8. P. 800–807.
26. Tatami J., Toyama M., Noguchi K. et al. Effect of TiO_2 and AlN additions on the sintering behavior of the Si_3N_4 – Y_2O_3 – Al_2O_3 System // *Key Engineering Materials*. 2003. Vol. 247. P. 83–86.
27. Yu F.L., Bai Y., Han P.D. et al. Spark plasma sintering of α/β Si_3N_4 ceramics with MgO – Al_2O_3 and MgO – Y_2O_3 as sintering additives // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25. No. 12. P. 5220–5224.
28. Andreev P., Drozhilkin P., Alekseeva L. et al. Spark plasma sintering of Si_3N_4 ceramics with Y_2O_3 – Al_2O_3 (3 %–10 % wt.) as sintering additive // *Coatings*. 2023. Vol. 13. No. 2. P. 240.
29. Lysenkov A.S., Ivicheva S.N., Titov D.D. et al. Silicon nitride ceramics with light-melting sintering additive in CaO – TiO_2 system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 525. No. 1. P. 012080.
30. Satet R.L., Hoffmann M.J., Cannon R.M. Experimental evidence of the impact of rare-earth elements on particle growth and mechanical behavior of silicon nitride // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 422. No. 1–2. P. 66–76.
31. Marchi J., Guedes e Silva C.C., Silva B.B. et al. Influence of additive system (Al_2O_3 – RE_2O_3 , $\text{RE} = \text{Y}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Dy}, \text{Yb}$) on microstructure and mechanical properties of silicon nitride-based ceramics // *Materials Research*. 2009. Vol. 12. P. 145–150.
32. Tatami J., Chen I.W., Yamamoto Y. et al. Fracture resistance and contact damage of TiN particle reinforced Si_3N_4 ceramics // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2006. Vol. 114. No. 1335. P. 1049–1053.
33. Huang J.W., Dong X.F., Lv X.A. et al. Microstructure and mechanical properties of highly dense Si_3N_4 ceramics with ZrN – AlN – Re_2O_3 ($\text{Re} = \text{Yb}, \text{Y}, \text{Nd}, \text{Ce}, \text{La}$) additives // *Ceramics International*. 2024. Vol. 50. No. 1. P. 429–437.
34. Tatami J., Katashima T., Komeya K., Meguro T., Wakihara T. Electrically conductive CNT-dispersed silicon nitride ceramics // *Journal of the American Ceramic Society*. 2005. No. 88 (10). P. 2889–2893.

References

1. Klemm H. Silicon nitride for high-temperature applications. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, vol. 93, no. 6, pp. 1501–1522.
2. Kita H., Hirao K., Hyuga H. et al. Review and overview of silicon nitride and SiAlON , including their applications. *Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties*. Elsevier Inc., 2013, 1213 p.
3. Hampshire S. Silicon nitride ceramics – review of structure, processing and properties. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, 2007, vol. 24, no. 1, pp. 43–50.
4. Tan D.W., Zhu L.L., Wei W.X. et al. Performance improvement of Si_3N_4 ceramic cutting tools by tailoring of phase composition and microstructure. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, no. 16, pp. 26182–26189.
5. Nakashima Y., Zhou Y., Tanabe K. et al. Effect of microstructures on dielectric breakdown strength of sintered reaction-bonded silicon nitride ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2023, vol. 106, no. 2, pp. 1139–1148.

6. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
7. Gromov V.I., Yakusheva N.A., Vostrikov A.V., Cherkashneva N.N. High strength structural steels for gas-turbine engine shafts (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 3–12. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
8. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 61–81. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-61-81.
9. Evdokimov S.A., Shchegoleva N.E., Kachaev A.A. Methods for joining ceramic composite materials based on SiC with ceramic and metallic materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), pp. 75–83. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-75-83.
10. Babinova A.A., Knyazev A.V., Belyachenkov I.O., Sorokin O.Yu. Testing the resistance of ceramics materials to high temperatur corrosion at a temperature of 900 °C. *Aviation materials and technologies*, 2025, no. 1 (78), pp. 99–110. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: February 20, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2025-0-1-99-110.
11. Belyachenkov I.O., Schegoleva N.E., Chainikova A.S., Vaganova M.L., Shavnev A.A. The influence of sintering and modifying additives on the sintering process and the properties of silicon nitride ceramics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 70–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-70-78.
12. Vikulin V.V. Production of Si₃N₄-Based Products and Their Application in the Aerospace Industry. *Perspektivnye materialy*, 2006, no. 5, pp. 14–19.
13. Andrievsky R.A., Spivak I.I. *Silicon Nitride and Materials Based on It*. Moscow: Metallurgiya, 1984, 137 p.
14. Kosolapov T.Ya., Andreev T.V., Bartnitskaya T.B. et al. *Non-metallic Refractory Compounds*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 224 p.
15. Kumar A., Gokhale A., Ghose S., Aravindan S. Effect of nano-sized sintering additives on microstructure and mechanical properties of Si₃N₄ ceramics. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, vol. 750, pp. 132–140.
16. Perevislov S.N., Chupov V.D. Production of high-density materials based on ultra-dispersed silicon nitride powder. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2010, no. 3, pp. 17–23.
17. Attia M.A.A., Ewais E.M.M. Hot pressed Si₃N₄ ceramics using MgO–Al₂O₃ as sintering additive for vehicle engine parts. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2020, vol. 61, no. 4, pp. 384–392.
18. Wang W., Pan Y., Zeng Y.P. et al. Effect of sintering aids content and powder characteristics on gas pressure sintered Si₃N₄ ceramics. *Ceramics International*, 2024, vol. 50, no. 5, pp. 8260–8268.
19. Jiang Q.G., Guo W.M., Liu W. et al. Influence of powder characteristics on hot-pressed Si₃N₄ ceramics. *Science of Sintering*, 2017, vol. 49, no. 1, pp. 81–89.
20. Zhao C.C., Kim M.J., Lee J.W. et al. Mechanical properties and stability of Si₃N₄ ceramics treated by hot isostatic pressing. *Ceramics International*, 2025, vol. 51, no. 24, pp. 41474–41481.
21. Santos C., Strecker K., Baldacim S.A. et al. Influence of additive content on the anisotropy in hot-pressed Si₃N₄ ceramics using grain orientation measurements. *Ceramics International*, 2004, vol. 30, no. 5, pp. 653–659.
22. Perevislov S.N. Mechanism of liquid-phase sintering of silicon carbide and nitride with oxide activating additives. *Steklo i keramika*, 2013, vol. 86, no. 7, pp. 34–38.
23. Perevislov S.N. *Materials based on silicon carbide and nitride with oxide activating additives for structural products*: thesis abstract, Dr Sc. (Tech.). St. Petersburg, 2018, 203 p.
24. Lysenkov A.S. *Structural ceramics based on silicon nitride with the addition of calcium aluminates*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2014, 139 p.
25. Lee H.M., Tatami J., Kim D.K. Microstructural evolution of Si₃N₄ ceramics from starting powders with different α -to- β ratios. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2016, vol. 124, no. 8, pp. 800–807.

26. Tatami J., Toyama M., Noguchi K. et al. Effect of TiO_2 and AlN additions on the sintering behavior of the $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3$ System. *Key Engineering Materials*, 2003, vol. 247, pp. 83–86.
27. Yu F.L., Bai Y., Han P.D. et al. Spark plasma sintering of α/β Si_3N_4 ceramics with $\text{MgO--Al}_2\text{O}_3$ and $\text{MgO--Y}_2\text{O}_3$ as sintering additives. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, vol. 25, no. 12, pp. 5220–5224.
28. Andreev P., Drozhilkin P., Alekseeva L. et al. Spark plasma sintering of Si_3N_4 ceramics with $\text{Y}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3$ (3 %–10 % wt.) as sintering additive. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 2, p. 240.
29. Lysenkov A.S., Ivicheva S.N., Titov D.D. et al. Silicon nitride ceramics with light-melting sintering additive in CaO--TiO_2 system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 525, no. 1, p. 012080.
30. Satet R.L., Hoffmann M.J., Cannon R.M. Experimental evidence of the impact of rare-earth elements on particle growth and mechanical behavior of silicon nitride. *Materials Science and Engineering: A*, 2006, vol. 422, no. 1–2, pp. 66–76.
31. Marchi J., Guedes e Silva C.C., Silva B.B. et al. Influence of additive system ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{--RE}_2\text{O}_3$, $\text{RE} = \text{Y, La, Nd, Dy, Yb}$) on microstructure and mechanical properties of silicon nitride-based ceramics. *Materials Research*, 2009, vol. 12, pp. 145–150.
32. Tatami J., Chen I.W., Yamamoto Y. et al. Fracture resistance and contact damage of TiN particle reinforced Si_3N_4 ceramics. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2006, vol. 114, no. 1335, pp. 1049–1053.
33. Huang J.W., Dong X.F., Lv X.A. et al. Microstructure and mechanical properties of highly dense Si_3N_4 ceramics with $\text{ZrN--AlN--Re}_2\text{O}_3$ ($\text{Re} = \text{Yb, Y, Nd, Ce, La}$) additives. *Ceramics International*, 2024, vol. 50, no. 1, pp. 429–437.
34. Tatami J., Katashima T., Komeya K., Meguro T., Wakiyama T. Electrically conductive CNT-dispersed silicon nitride ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, no. 88 (10), pp. 2889–2893.

Информация об авторах

Холодова Вероника Владимировна, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вершинин Дмитрий Игоревич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Щеголева Наталья Евгеньевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Veronika V. Kholodova, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry I. Vershinin, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalia E. Shchegoleva, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.04.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.04.2026.
The article was submitted 03.04.2026; approved and accepted for publication after reviewing 22.04.2026.