

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №10 (172). С.3-11.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №10 (172). P.3-11.

Научная статья

УДК 666.651.6

doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-3-11

DLP 3D печать корундовой керамики: разработка температурно-временных режимов обжига и физико-механические свойства спеченной керамики, полученной аддитивным методом

Янис Юрьевич Верхошанский¹, аспирант

Дмитрий Александрович Ткачев², аспирант

Александр Игоревич Термигалиев³, студент

^{1, 2, 3} Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

¹ vevrkhoshanskiy@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5550-9643>

² d.tkachev11@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1969-2927>

³ temirgaliev1al@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6397-0462>

Аннотация. В работе показано применение проекционной стереолитографической 3D-печати методом цифровой световой обработки (DLP) для получения изделий из корундовой керамики марки ВК-95-1. Для DLP 3D-печати использовалась фотополимерная керамическая суспензия с 70 масс. % керамического порошка марки ВК-95-1. На основе данных термогравиметрического (ТГ) и дифференциального сканирующего калориметрического (ДСК) анализов разработаны температурные режимы удаления связующего (дебиндинга) и спекания. Показано, что ступенчатый дебиндинг со скоростью нагрева 0,4...0,5 °С/мин и выдержками при 300, 375 и 470 °С, а также последующее спекание при 1600 °С обеспечили достижение относительной плотности до 95 % от теоретической ($3,47 \pm 0,02$ г/см³). Водопоглощение составило $0,69 \pm 0,19$ %, что свидетельствует о преобладании в спеченной керамике закрытой пористости. Предел прочности при трёхточечном изгибе спечённых образцов варьировался от 180 до 250 МПа в зависимости от ориентации слоёв относительно вектора нагружения: максимальные значения (250 ± 30 МПа) были зафиксированы при воздействии нагрузки вдоль оси печати, демонстрируя характерную для аддитивных технологий анизотропию свойств. Твёрдость по Виккерсу составила 850 ± 25 HV. Согласно результатам микроструктурного анализа установлено, что разработанный режим термообработки обеспечивает полное удаление полимерного связующего и получение спеченной керамики с равномерным распределением зерен по размерам, со средним размером зерна 5,1 мкм. Таким образом, совокупность полученных результатов подтверждает применимость рассмотренного аддитивного метода для формирования сложной геометрии изделий из корундовой керамики ВК-95-1.

Ключевые слова: 3D печать, керамика, фрактография, механические свойства, микроструктура

Благодарности: результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России, проект No FSWM-2025-0010.

Для цитирования: Верхошанский Я.Ю., Ткачев Д.А., Термигалиев А.И. DLP 3D печать корундовой керамики: разработка температурно-временных режимов обжига и физико-механические свойства спеченной керамики, полученной аддитивным методом // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 10 (172). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-3-11

DLP 3D printing of corundum ceramics: development of temperature-time firing modes and physical mechanical properties of sintered ceramics obtained by the additive method

Yanis Yu. Verkhoshanskiy¹, PhD student

Dmitry A. Tkachev², PhD student

Alexander I. Temirgaliev³, Student

^{1, 2, 3} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ vevrkoshanskiy@yandex.ru

² d.tkachev11@gmail.com

³ temirgaliev1al@yandex.ru

Abstract. The paper shows the use of projection stereolithographic 3D printing by digital light processing (DLP) to produce VTC-95-1 corundum ceramics. Based on data from thermogravimetric (TG) and differential scanning calorimetric (DSC) analyses, temperature regimes of debinding and clinkering have been developed. It is shown that graded debinding with a heating rate of 0,4...0,5 °C/min and exposures at 300, 375 and 470 °C, as well as subsequent clinkering at 1600 °C, ensured the achievement of a relative density of up to 95 % of the theoretical ($3,47 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$). The water absorption was $0,69 \pm 0,19 \%$, which indicates the predominance of closed porosity in sintered ceramics. The tensile strength during three-point bending of sintered samples ranged from 180 to 250 MPa, depending on the orientation of the layers relative to the loading vector: the maximum values ($250 \pm 30 \text{ MPa}$) were placed on record when exposed to a load along the printing axis. The Vickers hardness was $850 \pm 25 \text{ HV}$. According to the results of the microstructural analysis, it was found that the developed heat treatment mode ensures the complete removal of the polymer binder and provides the production of sintered ceramics with a uniform grain size distribution, with an average grain size of 5,1 microns. Thus, the totality of the results obtained confirms the applicability of the considered additive method for forming the geometry of VTC-95 corundum ceramics.

Keywords: 3D printing, ceramics, fractography, mechanical properties, microstructure

Acknowledgements: The results were obtained within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia, project No FSWM-2025-0010.

For citation: Verkhoshanskiy Ya. Yu., Tkachev D.A., Temirgaliev A.I., DLP 3D printing of corundum ceramics: development of temperature-time firing modes and physical mechanical properties of sintered ceramics obtained by the additive method / Science intensive technology in mechanical engineering. 2025. № 10 (172). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-3-11

Введение

Корундовая керамика марки ВК-95-1, содержащая 95,3 % Al_2O_3 , является важным материалом для высокотехнологичных отраслей ввиду сочетания высокой механической прочности (310 МПа при трехточечном изгибе), термостойкости (до 1600 °C) и диэлектрических свойств. Однако традиционные методы формования, такие как прессование и литьё, ограничены в возможности получения изделий сложной геометрии, что обуславливает растущий интерес к аддитивным технологиям, в частности к стереолитографической 3D-печати методом цифровой световой обработки (DLP).

Применение DLP-метода открывает перспективы для создания сложнопрофильных керамических изделий. В предыдущих работах была разработана фотополимерная композиция на основе керамики ВК-95-1 для 3D-печати [1].

Важнейшим этапом остаётся постобработка напечатанных изделий – дебиндинг и спекание, которые напрямую влияют на плотность, микроструктуру и механические характеристики готовых образцов.

Удаление связующего осуществляется путём термического разложения фотополимера, после чего следует спекание при температурах выше 1400 °C. При этом нагрев проводится на низких скоростях ($< 1 \text{ °C/мин}$), поскольку нарушение температурного режима может привести к образованию дефектов, таких как остаточные напряжения, микротрещины и неоднородности плотности [2].

Целью данной работы является исследование влияния режимов дебиндинга и спекания на микроструктуру и физико-механические характеристики керамики ВК-95-1, полученной методом 3D DLP-печати.

Материалы и методы

Для подготовки керамических фотоотверждаемых суспензий использовался порошок на основе корунда марки ВК-95-1 (ООО «Омега», Россия) предназначенный для производства вакуум плотных изделий.

В качестве фотополимерного связующего использовался состав на основе из смеси диметакрилового олигоэфира (25 масс. %), диметакрилового олигогликоля (25 масс. %), метакрилового (фенил) эфирного мономера (45 масс. %), олигоуретан диметакрилата (24 масс. %) и 2 масс. % фотоинициатора радикальной полимеризации 2,2-диметокси 2-фенил ацетофенона (коммерческое название Irgacur 651) [3]. Для регулирования процессов полимеризации в работе использовался 2, 4, 6-триметилбензоилдифенилфосфиноксид (ТРО).

На основе ранее проведенных исследований [1] был подготовлен состав для 3D печати, содержащий 70 масс. % порошка керамики ВК-95-1, который предварительно был диспергирован в среде этилового спирта с добавлением диспергатора ВУК-111 (Disperbyk, Германия) для более равномерного распределения в фотополимерном связующем при смешивании. Дополнительно в состав для 3D печати вводили 0,5 масс. % фотоинициатора ТРО для повышения скорости и эффективности полимеризации.

3D печать образцов осуществлялась с использованием 3D принтера Anycubic Photon mono (Anycubic, Китай). Стереолитографическая 3D-печать образцов осуществлялась при следующих параметрах: высота слоя – 70 мкм, время отверждения первых (базовых) слоёв – 40 с, последующих – 10 с. Пауза перед засветкой каждого слоя составляла 7 с, что обеспечивало равномерное распределение суспензии и стабильность процесса формирования слоёв.

Термогравиметрический (ТГ) и дифференциальный сканирующий калориметрический (ДСК) анализы выполнены на синхронном термическом анализаторе STA 449 F1 Jupiter (Netzsch, Германия) в воздушной атмосфере при скорости нагрева 10 °С/мин.

Предел прочности при трёхточечном изгибе определяли с использованием универсальной электромеханической испытательной машины Instron 3369. Твёрдость по Виккерсу измерялась на микротвердомере METOLAB-703 при нагрузке 20 кгс и выдержке 10 с.

Для определения предела прочности при трёхточечном изгибе использовались напечатанные спеченные образцы в форме балок размером 4×4×50 мм. В связи со слоистой структурой, обусловленной методом получения, испытания проводились для двух групп: с нагрузкой вдоль слоёв и перпендикулярно им. Схемы нагружения

представлены на рис. 1. Всего было испытано 10 образцов по 5 штук для каждой группы.

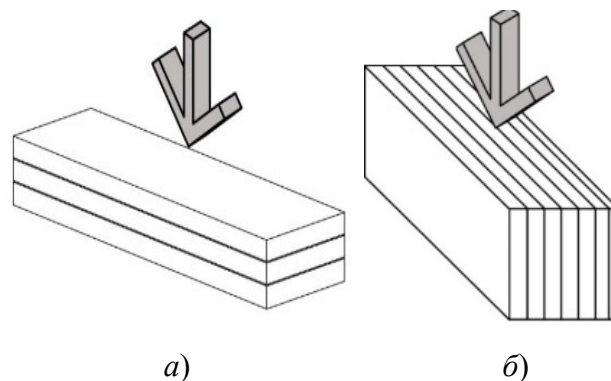


Рис. 1. Иллюстрации схем нагружения при проведении механических испытаний:
а – вдоль направления печати; б – перпендикулярно направлению печати

Fig. 1. Illustrations of loading schemes during mechanical tests:
a – along the printing direction; b – perpendicular to the printing direction

Плотность образцов определялась в соответствии с ГОСТ 24409-80, водопоглощение – по методике, установленной ГОСТ 7025-91.

Результаты

Результаты ТГ/ДСК анализа полимеризованного состава с содержанием 70 масс. % керамического порошка представлены на рис. 2.

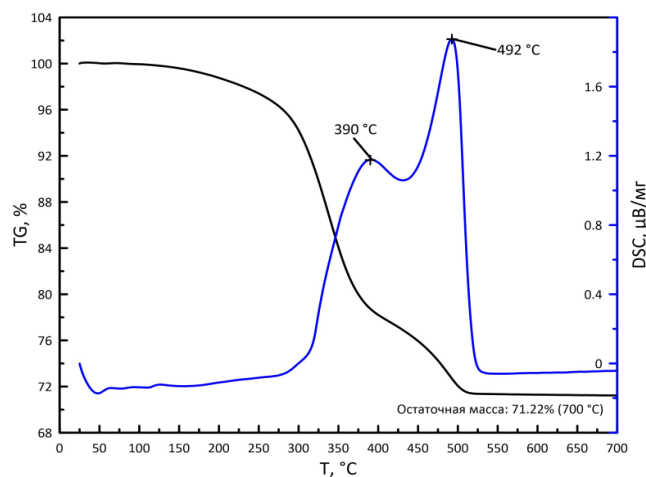


Рис. 2. ТГ/ДСК кривые термического разложения полимеризованной композиции с 70 масс. % порошка ВК-95-1

Fig. 2. TGA/DSC curves of thermal decomposition of a polymerized composition with 70 wt. % powder VTC-95-1

По результатам ТГ/ДСК анализа наблюдалось два экзотермических пика с максимумами в 390 °С и 492 °С. Интенсивное

разложение с потерей массы начинается после 250 °С. После 530 °С потеря массы прекращается, что указывает на то, что разложение связующего завершается до того, как температура достигает 600 °С. Значение остаточной массы ~ 70 % также может указывать на полное разложение полимерного связующего, так как для анализа использовался отвержденный образец, состоящий из 70 масс. % керамического порошка 30 масс. % фотополимерного связующего. Для полного удаления органических компонентов в процессе дебиндинга температурный режим должен учитывать все пики, зафиксированные на ТГ/ДСК-кривой. Расслоение, микротрещины и неравномерно распределённые поры являются типичными дефектами изделий, полученных аддитивными технологиями. Чтобы минимизировать их возникновение, необходимо тщательно подбирать скорость нагрева и выдержки на температурных плато, соответствующих этим пикам.

Для проведения экспериментальных работ по влиянию различных условий дебиндинга и спекания были напечатаны образцы в виде балок (5×5×70 мм.) и цилиндров (10×15 мм) (рис. 3).



Рис. 3. Напечатанные образцы методом 3D DLP печати

Fig. 3. Printed samples by 3D DLP printing

На основе данных ТГ/ДСК-анализа (рис. 2) были сформированы три экспериментальных режима спекания, представленные на рис. 4. Температуры выдержек выбирались с учётом экзотермических пиков (390 °С и 492 °С), при которых, предположительно, происходит максимальное выделение энергии за счёт разложения компонентов фотополимерного связующего. В связи с этим выдержки проводились при промежуточных температурах – 300, 375 и 470 °С. Для каждого режима эти температуры фиксировались. Основные различия между режимами заключаются в скорости нагрева на отдельных участках и общем времени спекания.

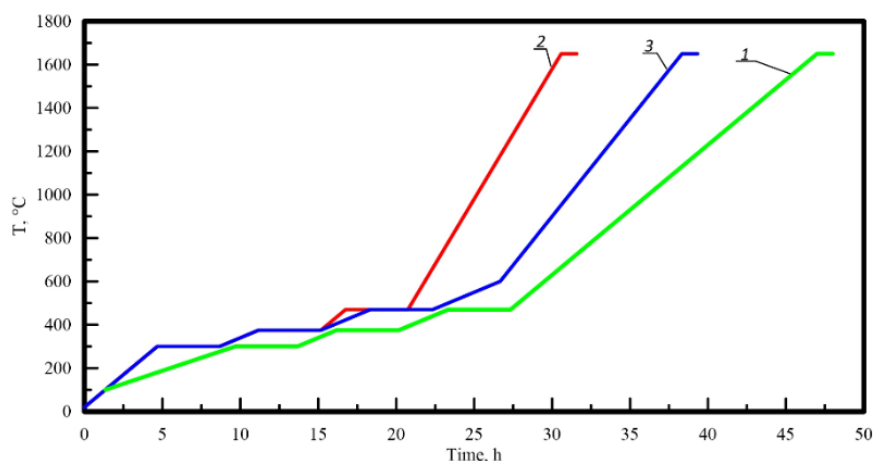


Рис. 4. Разработанные термические режимы дебиндинга и спекания:

1 – режим № 1; 2 – режим № 2; 3 – режим № 3

Fig. 4. Developed temperature regimes for debinding and clinkering:

1 – mode no. 1; 2 – mode no. 2; 3 – mode no. 3

Спекание образцов, полученных методом стереолитографической 3D-печати, изучалось для выявления оптимального режима дебиндинга, который обеспечивал бы отсутствие дефектов.

Режим № 1 (рис. 4) характеризуется медленным ростом температуры 0,4 до 300 °С,

в отличие от режимов № 2 и № 3, где скорость роста была установлена на 1 °С/мин. Медленный рост температуры на этом участке выбран в связи с потребностью в выпаривании влаги, которая может содержаться в образцах.

1. Экспериментальные режимы дебиндинга и спекания

1. Experimental modes of debinding and clinkering

	Режим № 1		Режим № 2		Режим № 3	
$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}/\text{min}$	$t_{\text{hold}}, \text{min}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}/\text{min}$	$t_{\text{hold}}, \text{min}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}/\text{min}$	$t_{\text{hold}}, \text{min}$
300	0,4	240	1	240	1	240
375	0,5	240	0,5	240	0,5	240
470	0,5	240	1	240	0,5	240
600	-	-	-	-	0,5	-
1650	1	60	2	60	1,5	60
25	-4	-	-4	-	-4	-

В результате спекания были получены образцы цилиндрической формы с межслойными трещинами (режимы № 2, № 3) и без видимых дефектов (режим № 1). Полученные в ходе спекания образцы со структурными дефектами, появившимися при спекании, изображены на рис. 5.

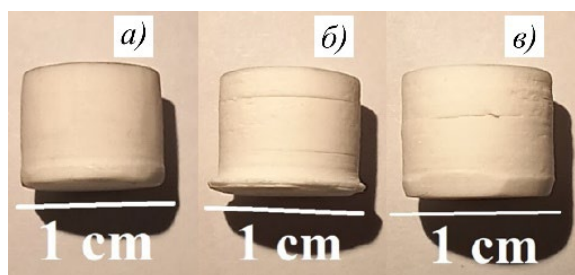


Рис. 5. Образцы цилиндрической формы, полученные при спекании по разработанным режимам:
а – Режим № 1; б – Режим № 2; в – Режим № 3

Fig. 5. Cylindrical shape samples obtained by clinkering according to the developed modes:
a – Mode no. 1; b – Mode no. 2; c – Mode no. 3

На основе полученных результатов установлено, что ключевым фактором, влияющим на формирование дефектов, является скорость нагрева на участке от 25 до 375 °С. В связи с этим для дальнейших исследований механических характеристик, микроструктуры и усадки был выбран режим спекания № 1.

При визуальном контроле образцов в виде балок (рис. 6) не наблюдалось структурных нарушений, в отличие от образцов в форме цилиндров. Данный эффект может быть связан с большей удельной площадью поверхности балок по сравнению с цилиндрами, благодаря чему газообразные продукты сгорания фотополимера выходят из образца более равномерно и по большей поверхности, не оставляя значительных межслойных трещин. Отношение площади поверхности полученных балок к объему –

0,836 мм⁻¹, цилиндров – 0,667 мм⁻¹ (различаются на ~ 20 %).



Рис. 6. Образцы в виде балок, полученные при спекании по экспериментальным режимам:
а – Режим № 1; б – Режим № 2; в – Режим № 3

Fig. 6. Samples in the form of beams obtained by clinkering according to experimental modes:
a – Mode no. 1; b – Mode no. 2; c – Mode no. 3

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что наиболее подходящим температурным режимом для спекания керамических образцов, полученных методом стереолитографической 3D печати, является режим № 1, поскольку при спекании образцов по данному режиму не были выявлены визуально обнаруживаемые структурные дефекты.

Для проведения дальнейших исследований образцы были подвергнуты термической обработке согласно режиму № 1. По результатам спекания установлено, что линейная усадка вдоль нормалей к оси роста составляла ~ 21 %, в то время как вдоль оси печати – 26 %. Такая анизотропия усадки характерна для изделий, полученных методом стереолитографической 3D-печати [4, 5], и обусловлена неравномерным распределением частиц, особенно в межслойных зонах, где формируется больше отвержденного фотополимера, усиливающего усадку.

Средняя плотность спечённых образцов составила $3,47 \pm 0,02$ г/см³, пористость – 5,71 %, массовое водопоглощение – $0,69 \pm 0,19$ %. Низкое водопоглощение указывает на преобладание закрытых пор в структуре.

Изображения микроструктуры вдоль оси печати представлены на рис. 7. Согласно данным микроскопии (рис. 7), материал имеет классическую зернистую структуру с размером зёрен от 2 до ~ 23 мкм. По всей площади образца наблюдаются поры, формирующиеся в процессе термического удаления связующего за счёт образования каналов для выхода газообразных продуктов. Средний размер пор составляет ~ 5,2 мкм.

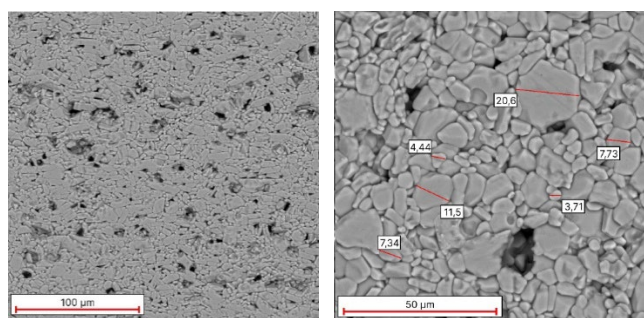


Рис. 7. Изображения микроструктуры спеченного образца

Fig. 7. Images of the microstructure of the sintered sample

Также для оценки качества проведенной термической обработки образцов изделий на предмет содержания остатков полимерного

связующего были проведены исследования элементного состава методом ЭДС-картирования с распределением элементов по составу. Результаты представлены на рис. 8.

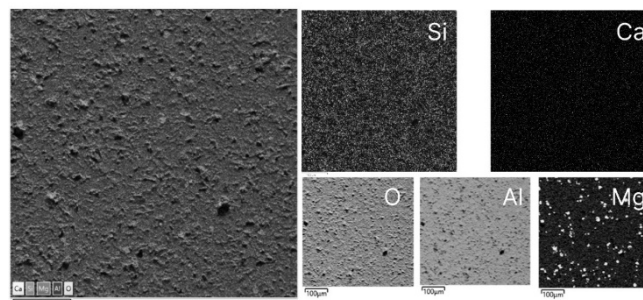


Рис. 8. Результаты ЭДС-картирования спеченного образца

Fig. 8. Results of EMF mapping of the sintered sample

По результатам ЭДС-картирования (рис. 8) не было обнаружено углерода, наличие которого может свидетельствовать о неполном удалении связующего. Также не было выявлено следов фосфорной кислоты, которая входит в состав диспергатора введенного в исходный керамический порошок. Образец характеризуется элементами согласно составу используемого керамического порошка (Al, Mg, Ca, Si).

Графики зависимости «напряжение – деформация» при трёхточечном изгибе были представлены на рис. 9.

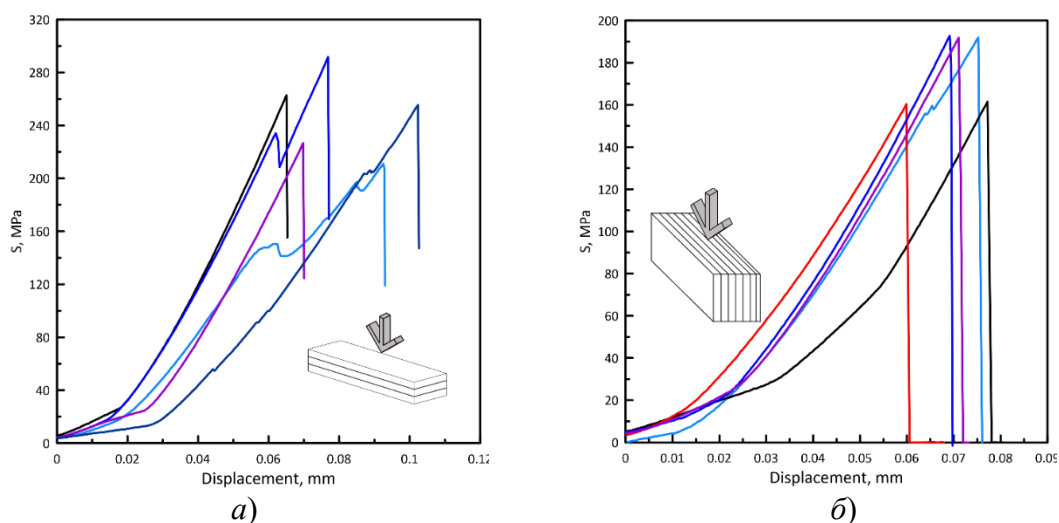


Рис. 9. Кривые «напряжение-деформация» при трёхточечном изгибе:

a – нагрузка по слоям вдоль направления печати; *б* – нагрузка по слоям перпендикулярно направлению печати

Fig. 9. Load-strain curves for three-point bending:

a – the load on the layers along the printing direction; *b* – the load on the layers perpendicular to the printing direction.

Образцы, нагружаемые перпендикулярно направлению слоёв, характеризовались более равномерным ростом нагрузки до момента разрушения (рис. 9, б). В то время как у образцов, нагружаемых вдоль направления слоёв, наблюдались резкие снижения нагрузки, свидетельствующие о неравномерном характере разрушения. Такое поведение, вероятно, было обусловлено особенностями внутренней структуры: при увеличении нагрузки происходило последовательное разрушение отдельных слоёв, что приводило к локальному снижению сопротивления материала.

На основании полученных данных (рис. 9, 10) было установлено, что предел прочности при изгибе для образцов, нагруженных вдоль направления печати, составлял $\sim 250 \pm 30$ МПа. Для образцов, нагружаемых перпендикулярно слоям, среднее значение предела прочности составило $\sim 180 \pm 21$ МПа, что на ~ 30 % ниже. При этом, согласно данным производителя используемой керамической композиции, номинальное значение предела прочности составляет ~ 310 МПа [6].

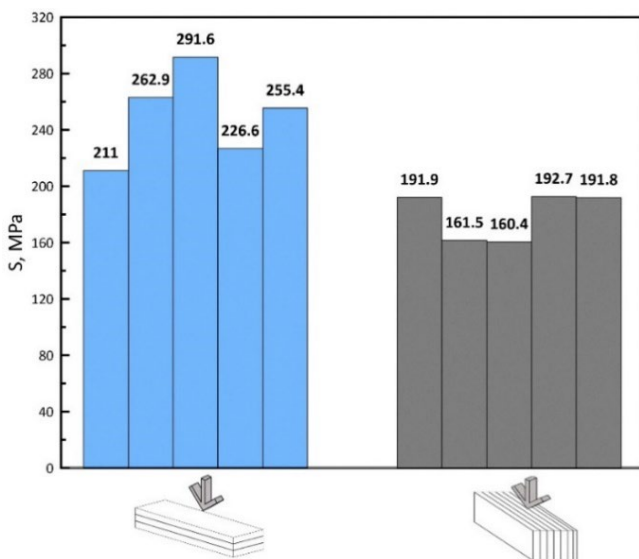


Рис. 10. Результаты испытаний по определению прочности при трёхточечном изгибе для различных групп образцов

Fig. 10. Test results for determining strength at three-point bending for various groups of samples

Исследования твердости полученных керамических образцов проводились по аналогичному принципу, образцы для индентирования располагались в плоскости вдоль и перпендикулярно направлению печати.

В рамках настоящей работы была определена твердость исследуемого материала по Виккерсу, которая составила ~ 850 ед. Данное значение заметно ниже результатов, приведенных в литературных источниках. Например, в работах [7] и [8] сообщается о твердости порядка 2100 и 2200 ед. соответственно, а в работе [9] приводятся значения в диапазоне от 1500 до 1600 ед. Твердость материала, полученного стереолитографической 3D-печатью, может быть ниже из-за неоднородной микроструктуры и остаточной пористости после спекания. Для улучшения свойств может потребоваться оптимизация максимальной температуры и времени спекания.

На основе полученных результатов (рис. 11) можно сделать вывод что среднее значение твердости по Виккерсу не зависит от ориентации образца при 3D печати, так как различие в значениях твердости в зависимости от ориентации составляет 1...2 %. Также можно отметить, что полученные значения твердости ниже, по сравнению с изделиями, полученных из такого же или аналогичного состава керамического порошка согласно классическим технологиям изготовления керамических изделий [10, 11].

Изображения микроструктуры керамического образца после испытания методом трёхточечного изгиба с приложением нагрузки вдоль направления печати представлены на рис. 11.

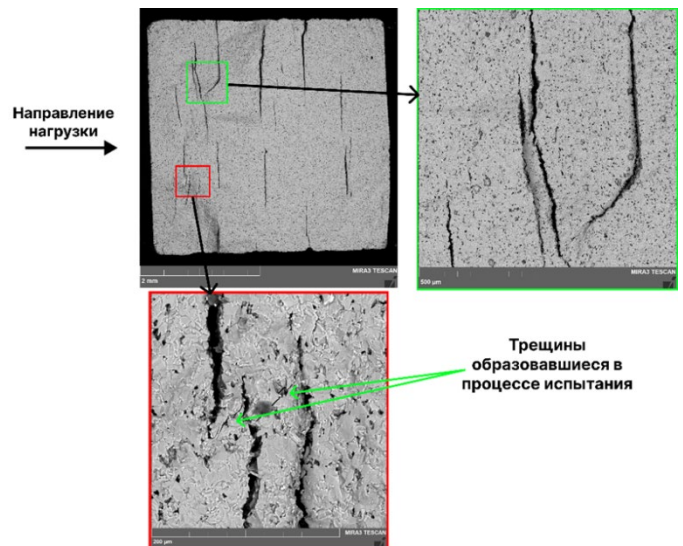


Рис. 11. Изображение микроструктуры спекленного керамического образца после испытания по определению предела прочности при трёхточечном изгибе

Fig. 11. Image of the microstructure of a sintered ceramic sample after a three-point bending strength test

По результатам анализа поверхности структуры разрушенного керамического образца наблюдаются множественные дефекты, вызванные расслоением. Такое количество дефектов скорее всего было образовано в ходе проведения термического удаления фотополимерного связующего. Также стоит отметить, что «слои», которые наблюдаются на рис. 12 не однородны. Наблюдаются слоистые дефекты толщиной от 80 до 300 мкм, в то время как настройки слоя при 3D печати соответствовали толщине 70 мкм, а после спекания происходит усадка до 30...50 мкм.

При исследовании поверхности разрушения керамических образцов, испытанных с приложением нагрузки перпендикулярно направлению печати (рис. 12), не было выявлено характерных отличий по сравнению с характеристиками изломов вышеописанных образцов.

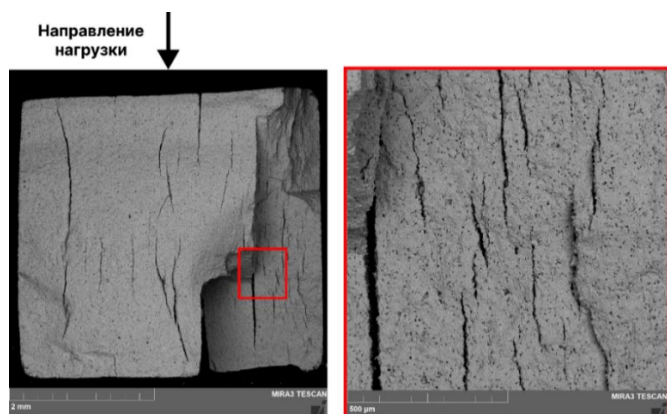


Рис. 12. Изображение микроструктуры поверхности образца после испытания при изгибе

Fig. 12. Image of the microstructure of the sample surface after bending test

По результатам исследования микроструктуры разрушения керамических образцов, полученных методом стереолитографической 3D печати, было выявлено, что все исследуемые образцы характеризовались наличием внутренних дефектов в виде трещин вдоль слоёв. В то же время, согласно результатам исследований механических характеристик образцов, можно предположить, что присутствует значительная межслойная адгезия. В большей степени разрушение образцов характеризовалось хрупкими изломами, при этом разрушение образцов по принципу расслоения встречались реже и не являлись основным типом разрушения.

Выводы

В настоящем исследовании рассмотрена возможность применения метода стереолитографической 3D-печати для формирования геометрии корундовой керамики марки ВК-95-1. На основе термического анализа (ТГ/ДСК) был разработан оптимальный режим удаления связующего и спекания, обеспечивающий минимизацию дефектов и достижение высоких эксплуатационных характеристик полученных изделий.

По результатам экспериментов установлено, что керамические образцы демонстрируют анизотропную усадку: ~ 21 % по направлениям Ox/Oy и ~ 26 % вдоль оси печати (Oz), что характерно для аддитивных технологий послойного формирования. При этом достигнута плотность до 95 % от теоретического значения, а водопоглощение составило 0,69 %, что свидетельствует о преимущественно закрытой пористости.

Согласно результатам микроструктурного анализа установлено, что разработанный режим термообработки обеспечивает полное удаление полимерного связующего и получение спеченной керамики с равномерным распределением зерен по размерам, со средним размером зерна 5,1 мкм. Механические испытания показали, что предел прочности при изгибе варьируется от 160 до 290 МПа, достигая максимальных значений (250 МПа) при нагружении вдоль направления печати. Твёрдость по Виккерсу составила около 850 ед. и не зависела от ориентации образцов. Анализ зон разрушения выявил два типа разрушения – хрупкое и слоистое, обусловленные особенностями межслойной структуры.

Полученные результаты подтверждают применимость рассмотренного аддитивного метода для формирования геометрии изделий корундовой керамики ВК-95

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Верхошанский Я.Ю., Ткачев Д.А., Темиргалиев А.И.** Разработка состава на основе корундовой керамики ВК-95 для DLP 3D печати // Южно-Сибирский научный вестник. 2024. № 6 (58). С. 180–189. DOI 10.25699/SSSB.2024.58.6.027. EDN CWQEFB.
2. **Zhang K.** Effects of solid loading on stereolithographic additive manufactured ZrO₂ ceramic: A quantitative defect study by X-ray computed tomography // Ceram. Int. Elsevier BV, 2021. Т. 47, № 17. С. 24353–24359.

3. Патент на изобретение RU:2685211:C2 USA. Жидкая фотополимеризующаяся композиция для лазерной стереолитографии / Гуревич Я.М.

4. Gao Y., Ding J. Low solid loading, low viscosity, high uniform shrinkage ceramic resin for stereolithography based additive manufacturing // *Procedia Manuf.* Elsevier BV. 2020. Т. 48. С. 749–754.

5. Yu X. Significantly improved sintering shrinkage of heavy calcium carbonate ceramic cores by binder jetting using Al powder additive // *Ceram. Int.* Elsevier BV, 2024. Т. 50, № 21. С. 40922–40931.

6. ВК 95. 2024. (Электронный ресурс) URL: <https://omegaceramic.ru/vk-95-1/> (дата обращения: 08.04.2025).

7. Патент на изобретение RU:2641683:C1 USA. Способ получения керамических изделий сложной объемной формы / Буяков А.С.

8. Promakhov V. V. On the possibility to fabricate ceramics using fused deposition modeling. 2016.

9. Маликов Е.В., Непочатов Ю.К., Плетнев П.М. Влияние добавок оксидов иттрия и магния на характеристики корундовой бронекерамики // *Огнеупоры и техническая керамика.* 2013. № 4–5. С. 35–39. EDN UEAYYR.

10. Liu H. H. Effects of MgO and Y₂O₃ on the microstructure and mechanical properties of Al₂O₃ ceramics // *Key Engineering Materials.* 2014. Т. 589. С. 572–577.

11. Jia X. Enhanced thermal shock resistance of Al₂O₃, MgO castables with MgAl₂O₄ interfacial layer between aggregate and matrix // *Ceram. Int.* Elsevier BV, 2024.

REFERENCES

1. Verkhoshansky Ya.Yu., Tkachev D.A., Temirgaliev A.I. Development of a composition based on VTC-95

corundum ceramics for DLP 3D printing // *South Siberian Scientific Bulletin*, 2024, no. 6 (58), pp. 180–189. DOI 10.25699/SSSB.2024.58.6.027. EDN CWQEFB.

2. Zhang K. Effects of solid loading on stereolithographic additive manufactured ZrO₂ ceramic: A quantitative defect study by X-ray computed tomography // *Ceram.* pp. 24353–24359.

3. Invention patent RU:2685211:C2 USA. Liquid photopolymerizable composition for laser stereolithography / Gurevich Ya.M.

4. Gao Y., Ding J. Low solid loading, low viscosity, high uniform shrinkage ceramic resin for stereolithography based additive manufacturing // *Procedia Manuf.* Elsevier BV. 2020. vol. 48. pp. 749–754.

5. Yu X. Significantly improved sintering shrinkage of heavy calcium no. 21. pp. 40922–40931.

6. VTC 95. 2024. (Electronic resource) URL: <https://omegaceramic.ru/vk-95-1/> / (date of access: 04/08/2025).

7. Invention patent RU:2641683:C1 USA. The method of obtaining ceramic products of complex volumetric shape / Buyakov A.S.

8. Promakhov V. V. On the possibility to fabricate ceramics using fused deposition modeling. 2016.

9. Malikov E.V., Nepochatov Yu.K., Pletnev P.M. The effect of additives of yttrium and magnesium oxides on the characteristics of corundum armored ceramics // *Refractories and technical ceramics*, 2013, no. 4–5. pp. 35–39. EDN UEAYYR.

10. Liu H. H. Effects of MgO and Y₂O₃ on the microstructure and mechanical properties of Al₂O₃ ceramics // *Key Engineering Materials.* 2014. vol. 589. pp. 572–577.

11. Jia X. Enhanced thermal shock resistance of Al₂O₃, MgO castables with MgAl₂O₄ interfacial layer between aggregate and matrix // *Ceram. Int.* Elsevier BV, 2024.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.04.2025; одобрена после рецензирования 19.05.2025; принята к публикации 31.07.2025.

The article was submitted 19.04.2025; approved after reviewing 19.05.2025; assepted for publication 31.07.2025.