

УДК 666.3

Тип статьи: обзорная статья

ГРНТИ 61.35.29

Научная специальность ВАК: 2.6.14 Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов (технические науки)

МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Юшин Д.И.¹, Нетреба А.Ю.¹, Рагуткин А.В.¹, Санжаровский А. Ю.²

¹ ФГБОУ ВО «МИРЭА — Российский технологический университет», РТУ МИРЭА

² Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»

АННОТАЦИЯ

В последние годы реализуется тренд на миниатюризацию функциональных керамических устройств при улучшении их характеристик. При этом сильно усложняется процесс их быстрого прототипирования и увеличивается себестоимость при использовании классических технологий производства.

Являясь развивающейся технологией, мультиматериальная 3D-печать способна не только обеспечить создание керамических изделий сложных форм (включая недоступные при использовании классических технологий), но и на порядок ускорить скорость прототипирования при значительном снижении себестоимости.

В данной статье рассматриваются последние достижения в области методов мультиматериальной 3D-печати, а также проводится всестороннее исследование функциональных керамических материалов и процессов, пригодных для 3D-печати, для различных функциональных керамических устройств, включая конденсаторы, многослойные подложки и микрополосковые антенны. Кроме того, определены ключевые проблемы и перспективы функциональных керамических устройств с 3D-печатью из нескольких материалов и обсуждены направления на будущее.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аддитивные технологии, керамика, HTCC, LTCC, мультиматериальная 3D-печать

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Юшин Д.И. Мультиматериальная 3D-печать керамических изделий / Юшин Д.И., Нетреба А.Ю., Рагуткин А.В., Санжаровский А.Ю. // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 1. – С. 35-46.

Type of article - review article

OECD 2.05 Materials engineering

PK MATERIALS SCIENCE, CERAMICS

MULTIMATERIAL 3D-PRINTING OF FUNCTIONAL CERAMIC DEVICES

Yushin D.I.¹, Ntreba A.Yu.¹, Ragutkin A.V.¹, Sanzharovskiy A.Yu.²

¹ MIREA - Russian Technological University

² Research Institute "Environmental Industrial Policy Centre" (EIPC)

ABSTRACT

In recent years, there has been a trend towards miniaturization of functional ceramic devices while improving their characteristics. At the same time, the process of rapid prototyping becomes much more complicated and the cost increases when using classical production technologies.

Being an evolving technology, multimaterial 3D printing is able not only to create ceramic products of complex shapes (including those inaccessible when using classical technologies), but also to accelerate the prototyping speed by orders of magnitude with a significant reduction in cost.

This article reviews the latest developments in the field of multimaterial 3D printing techniques, as well as a comprehensive study of functional ceramic materials and processes suitable for 3D printing for various functional ceramic devices, including capacitors, multilayer substrates and microstrip antennas. In addition, the key problems and prospects of functional ceramic devices with 3D printing from several materials were identified and future directions were discussed.

KEY WORDS: additive technologies, ceramics, HTC, LTCC, multimaterial 3D-printing

FOR CITATION: Yushin D.I. Multimaterial 3D printing of ceramic products / Yushin D.I., Ntreba A.Yu., Ragutkin A.V., Sanzharovskiy A.Yu. // Technique and technology of silicates. – 2023. – Vol. 31, No. 1. – Pp. 35-46.

ВВЕДЕНИЕ

Функциональные керамические устройства используются в самых разнообразных областях, таких как авиация, автомобилестроение, интегральные схемы, связь, медицина и энергетика и др. Большинство функциональных керамических устройств, таких как многослойные керамические конденсаторы, многослойные керамические подложки, фильтры, антенны и т.д. могут быть изготовлены методом высокотемпературной керамики с совместным нагревом (HTCC) или низкотемпературной керамики с совместным нагревом (LTCC). Эти процессы включают в себя несколько этапов: (1) подготовка материала для керамических лент и функциональных паст, (2) штамповка зеленых лент для сквозного формования, (3) заполнение и металлизация для формирования вертикальных проводников и горизонтального рисунка, (4) укладка и ламинирование для формирования трехмерного керамического зеленого тела (5) совместное обжиг и (6) последующая обработка, включая металлизацию и пайку. В результате нанесения металлических (например, на основе серебра, золота, вольфрама и молибдена) и резисторных паст на керамическую подложку получают многослойные керамические компоненты. Основным недостатком этих технологий является отсутствие возможности их использования для быстрого прототипирования из-за сложности процессов и их высокой стоимости. Помимо прочего, сильно ограничена геометрия создаваемых таким образом изделий, а также невозможна их миниатюризация.

В последние годы было показано, что 3D-печать позволяет нивелировать большинство вышеописанных проблем. Выявленные же недостатки процессов аддитивного производства функциональных керамических изделий обозначают пути дальнейшего развития.

Как итог, технологии мультиматериальной 3D-печати функциональных керамических устройств находятся на ранней стадии разработки и обладают большой исследовательской мотивацией и потенциалом применения. В результате работ коллектива лаборатории «Аддитивное производство электроники» РТУ МИРЭА в рамках Государственного задания «Исследования и разработки методов аддитивного производства электроники» под руководством д.т.н. Рагуткина Александра Викторовича было выявлено, что максимальным потенциалом к мультиматериальной печати керамических электронных компонентов обладают технологии струйного нанесения материала (MJ), прямого нанесения чернил (DIW), моделирования методом послойного наплавления (FDM) в сочетании с технологиями фотополимерной печати (SLA и DLP), например, для нанесения тонких покрытий. В данной статье рассматриваются последние достижения в области мультиматериальной 3D-печати функциональных керамических устройств, включая опыт лаборатории «Аддитивное производство электроники» РТУ МИРЭА. В виду того, что обзорных публикаций и ревью опубликовано довольно много, на основе их анализа и опыта работы авторов данной публикации, для рассмотрения были выбраны FDM, SLA, DLP и гибридный метод мультиматериальной 3D-печати. Обозначены существующие проблемы и будущие направления развития мультиматериальной 3D-печати функциональных керамических устройств, что, как ожидается, поддержит будущие исследования.

INTRODUCTION

Functional ceramic devices are used in a wide variety of fields, such as aviation, automotive, integrated circuits, communications, medicine and energy, etc. Most functional ceramic devices such as multilayer ceramic capacitors, multilayer ceramic substrates, filters, antennas, etc. can be manufactured using high-temperature coheated ceramics (HTCC) or low-temperature coheated ceramics (LTCC). These processes include several steps: (1) preparation of the material for ceramic tapes and functional pastes, (2) stamping of green tapes for end-to-end molding, (3) filling and metallization to form vertical conductors and a horizontal pattern, (4) laying and lamination to form a three-dimensional ceramic green body (5) joint firing and (6) subsequent processing, including metallization and soldering. As a result of applying metal (for example, on the basis of silver, gold, tungsten and molybdenum) and resistor pastes to a ceramic substrate, multilayer ceramic components are obtained. The main disadvantage of these technologies is the inability to use them for rapid prototyping due to the complexity of the processes and their high cost. In addition, the geometry of the products created in this way is severely limited, and their miniaturization is also impossible.

In recent years, it has been shown that 3D printing can eliminate most of the problems described above. The revealed disadvantages of the processes of additive manufacturing of functional ceramic products mean the ways of further development.

As a result, the technologies of multimaterial 3D printing of functional ceramic devices are at an early stage of development and have great research motivation and application potential. As a result of the work of the team of the laboratory "Additive Manufacturing of Electronics" of RTU MIREA within the framework of the State Task "Research and development of methods of additive manufacturing of electronics" under the guidance of a Doctor of Technical Sciences. It was revealed by Alexander V. Ragutkin that the technologies of inkjet material deposition (MJ), direct ink application (DIW), layer-by-layer deposition (FDM) modeling in combination with photopolymer printing technologies (SLA and DLP) have the maximum potential for multimaterial printing of ceramic electronic components, for example, for applying thin coatings. This article discusses the latest achievements in the field of multimaterial 3D printing of functional ceramic devices, including the experience of the laboratory "Additive Manufacturing of electronics" of RTU MIREA. Since there are quite a lot of review publications and reviews published, based on their analysis and the experience of the authors of this publication, FDM, SLA, DLP and a hybrid method of multimaterial 3D printing were chosen for review. The existing problems and future directions for the development of multimaterial 3D printing of functional ceramic devices are outlined, which is expected to support future research.

The purpose or objectives of the study:

This article examines the latest achievements in the field of multimaterial 3D printing of functional ceramic devices and describes the results of the authors' work in this direction. Since there are quite a lot of review publications and

Цель или задачи исследования:

В данной статье рассматриваются последние достижения в области мультиматериальной 3D-печати функциональных керамических устройств, а также описываются результаты работы авторов в данном направлении. В виду того, что обзорных публикаций и ревью опубликовано довольно много, на основе их анализа и опыта работы авторов данной публикации, для рассмотрения были выбраны FDM, SLA, DLP и гибридный метод мультиматериальной 3D-печати. Обозначены существующие проблемы и будущие направления развития мультиматериальной 3D-печати функциональных керамических устройств, что, как ожидается, поддержит будущие исследования.

reviews published, based on their analysis and the experience of the authors of this publication, FDM, SLA, DLP and a hybrid method of multimaterial 3D printing were selected for consideration. The existing problems and future directions of development of multimaterial 3D printing of functional ceramic devices are outlined, which is expected to support future research.

Materials and methods

Analysis, generalization and concretization of information within the framework of the purpose of the work, analysis of literary sources, experimental research

Материалы и методы исследования

Анализ, обобщение и конкретизация информации в рамках цели работы, анализ литературных источников, экспериментальные исследования.

ТАБЛИЦА 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЧЕРНИЛ
Table 1. Brief description of the developed functional inks

Типы чернил Ink types	Методы печати Printing methods	Применение Application	Электрические свойства Electrical properties
1	2	3	4
Чернила с металлическими наночастицами (MNPs)	Серебряные чернила MNPs; EHD [5], IJP [6]	Носимая электроника [5,6]	0,08–4,74 Ом · м ⁻¹ после 1 ч спекания при 150 °С [6]; 0,4 Ом · м ⁻¹ после 30 мин термического спекания при 250 °С [5]
	Золотые чернила MNPs; IJP [7], AJP [8]	Неферментативные электрохимические датчики [7]; микроплитки [8]	0,06 Ом · см ⁻¹ после 30-минутного термического спекания при 100 °С [7]; 8,7 ± 2,5 мОм · см после 1 ч термического спекания при 120 °С с последующим 250 °С в течение 4 ч [8]
	Медные чернила MNP; IJP [9], END [10]	Проводящие дорожки [39]; микроэлектронные устройства [10]	6,18 Ом · м ⁻¹ после подачи 5454 энергии [9]; 9,20 мОм · см после 1 ч термического спекания при 230 °С в инертной атмосфере [10]
	Цинковые чернила MNPs; IJP [11], AJP [12]	Гибкая электроника [11]; биорезорбируемая электроника [12]	~102 С/см ⁻¹ [11]; 22,32 С/см ⁻¹ было достигнуто после 2 мс спекания при 1 вспышке с энергией 25,88 Дж/см ² , а конечная проводимость 34,72 С/см ⁻¹ была достигнута при оптимальной мощности лазера [12]
Проводящие полимерные чернила	ПЕДОТ: чернила PSS; IJP [13], AJP [14]	Органические солнечные элементы [13]; решетки μ-игольчатых электродов [14]	0,02 С · см ⁻¹ после 20 мин термического отжига при 120°С (толщина 120 нм) [13]; 0,323 ± 0,075 С · см ⁻¹ [14]
	BVL: чернила PEI; Покрытие распылением [15]	Органические электрохимические транзисторы и биоэлектроника [15]	8 С · см ⁻¹ после 2-часового термического отжига при 140°С в среде азота [15]
Чернила на основе керамических наночастиц (CNP)	Чернила на основе Al ₂ O ₃ CNPs; IJP [16]	Тонкопленочные радиочастотные конденсаторы [15]	Диэлектрическая проницаемость напечатанного слоя алюминия (толщина ~120 нм со среднеквадратичной шероховатостью поверхности ~0,5 нм после термического отжига при 400°С) составила 6,2 [16]
	Чернила BaTiO ₃ CNPs; IJP [17], AJP [18]	Пьезоэлектрические генераторы [17]; конденсаторы со встречными контактами [18]	Пьезоэлектрический генератор имел напряжение в разомкнутой цепи ~7 В, плотность тока 0,21 мкА · см ⁻² и плотность мощности 0,42 мВт · см ⁻² [17]; диэлектрическая проницаемость составляла 7 [18]
	Чернила CNPs 3Y-TZP; IJP [19,20]	Диэлектрические пленки для микроэлектронных устройств [19,20]	-
	Чернила ZrO ₂ CNPs; IJP [21], EHD [22]	Диэлектрические слои для гибкой электроники [21]; резистивные переключатели [22]	Диэлектрическая пленка ZrO ₂ (диэлектрическая константа 10) обеспечивала плотность тока утечки 5,4 × 10 ⁻⁶ А/см ² при 1 МВ/см [21]. Напечатанный резистивный переключатель показал стабильное поведение при биполярном мемристивном переключении около = 3 В [22]

	Продолжение таблицы 1		
	2	3	4
	Чернила TiO ₂ CNPs; IJP [23,24]	Мезопористые слои для переноса электронов TiO ₂ для перовскитных солнечных элементов [23]; диэлектрические слои [24]	Перовскитовый солнечный элемент имел эффективность преобразования энергии 18,29% [23]; вольт-амперные характеристики проводящих устройств на основе оксида TiO ₂ -Ag показали поведение диода [24]
	Чернила Ba _{0,6} Sr _{0,4} TiO ₃ CNPs; IJP [25]	Диэлектрические слои для конденсаторов [25]	Относительная диэлектрическая проницаемость составила 28 ± 1,7, а диэлектрические потери - 0,043 ± 0,006 (при частоте 10 кГц) [25]
	Чернила CNPs Ca ₂ Nb ₃ O ₁₀ ; AJP [26]	Тонкопленочные транзисторы [26]	Пленки, нанесенные Ca ₂ Nb ₃ O ₁₀ с массовой долей 82 мас.%, показали диэлектрическую проницаемость 8,5 и диэлектрические потери 0,058 (при частоте 1 МГц) [26]
	Стеклосиликатные чернила CNPs; IJP [27]	Многослойные гибридные схемы [27]	
Диэлектрические полимерные чернила	полиимидные (PI) чернила; IJP [28]	Конденсаторы для микроэлектронных устройств [28]	Напечатанный конденсатор со слоем PI толщиной 25 ± 0,2 мкм показал значение емкости 103 пФ [28]
	Поли-4-винилфенольные (PVP) чернила; IJP [29]	Гибкие конденсаторы для носимой электроники [29]	Напечатанный конденсатор с ПВП-слоем толщиной 4,5 мкм показал значение емкости 163 пФ [29]
	Краски на поливиниловом спирте (ПВА); EHD [30]	Затворные изоляторы в органических полевых транзисторах [30]	Органические полевые транзисторы с затворными изоляторами на основе PVA демонстрируют стабильную работу при низких токах утечки на затворе [30]

ТАБЛИЦА 2. ПРИМЕРЫ МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Table 2 Examples of multimaterial 3D printing of functional ceramic products

Композиции Compositions	Технологии мультиматериальной 3d-печати Multimaterial 3D printing technologies	Применение Application	Свойства Properties	Источник Source
1	2	3	4	5
Диэлектрик(чернила): Ca ₂ NaNb ₄ O ₁₃ + изопропанол + 2-бутиловый спирт Проводник (чернила): Ag	IJP	Конденсаторы	Плотность емкости конденсатора составила =210 Пф/мм ²	[42]
Диэлектрик (чернила): Ba _{0,6} Sr _{0,4} TiO ₃ -ZnO-V ₂ O ₃ + бутилдигликоль + изопропиловый спирт + этилцеллюлоза Проводник (чернила): Ag	IJP	Варакторы	Варакторы показали настраиваемость в диапазоне от 14,4% до 16,4% при поле настройки 5 В/мкм	[43]
Диэлектрик(чернила): MgTiO ₃ Проводник (чернила): Ag	IJP	Конденсаторы		[44]
Диэлектрик (чернила): Pb _{0,97} La _{0,02} Zr _{0,53} Ti _{0,47} O ₃ + этиленгликоль + этаноламин Проводник (чернила): Ag	IJP	Конденсаторы		[45]
Диэлектрик(чернила): Ba _{0,6} Sr _{0,4} TiO ₃ + Поли(этиленгликоль) диакрилат Проводник (чернила): Ag	IJP	Многослойные керамические конденсаторы	Многослойные керамические конденсаторы показали плотность емкости = 500 Пф/мм ²	[46]
Диэлектрик (чернила): BaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -MnO-TiO ₂ Проводник (чернила): Cu	IJP	Многослойные керамические подложки	Коэффициент усадки многослойной керамической подложки составил =15%	[47]
Диэлектрик(чернила): BaTiO ₃ Проводник (/): Cu	AJP + травление + напыление + покрытие	Многослойные керамические подложки	Многослойная керамическая подложка показала диэлектрическую проницаемость = 3000 и диэлектрические потери = 7% при частоте 1 МГц	[48]
Диэлектрик(суспензия): Al ₂ O ₃ Проводник (суспензия): вольфрам	SLA + DIW	Многослойные керамические подложки	Многослойные керамические подложки показали модуль Юнга E = 280 = 11 ГПа	[49]

Продолжение таблицы 2				
1	2	3	4	5
Диэлектрик (чернила): ZrO ₂ Проводник (чернила): Ag	IJP + AJP	Микрополоско- вые антенны	Объемный ZrO ₂ показал относительную диэлектрическую проницаемость 23 и тангенс угла потерь 0,0013 на микроволновых частотах	[23]
Диэлектрик(чернила): SiO ₂ + гександиол- диакрилат (HDDA) + дисульфат алкил- дифенилоксида Проводник (чернила): Cu	IJP	Микрополоско- вые антенны	Сопротивление составляло 2,43 × 10 ¹³ Ом·см (толщина диэлектрического слоя 174,3 мкм)	[51]
Диэлектрик(нить накала): TiO ₂ + циклооле- финовый полимер (COP) Проводник (сус- пензия): Ag	FDM + DIW	Микрополоско- вые антенны	COP-TiO ₂ с 30%-ной добавкой по- казал относительную диэлектриче- скую проницаемость 4,56 и тангенс угла потерь 0,0016 после спекания при 1100°C	[52]
Диэлектрик (филамент): NdTiO ₃ + полиди- метилсилоксан (PDMS) Проводник (сuspension): Ag	FDM + DIW	Микрополоско- вые антенны	25%-ная нагрузка PDMS-NdTiO ₃ показала диэлектрическую прони- цаемость 9,22 и тангенс угла потерь 0,025 на частотах до 17 ГГц	[53]
Диэлектрик (филамент): MgCaTiO ₂ + PDMS Проводник (сuspension): Ag	FDM + DIW	Микрополоско- вые антенны	Микрополосковая антенна с частотой 19,6 ГГц показала обратные потери в 20 дБ при 10% ширине полосы пропускания	[54]

Эксперименты и обсуждение результатов

Должен быть гарантирован баланс вязкости и поверхностного натяжения, чтобы предотвратить образование капель-сателлитов или чернильного тумана. Безразмерное число $Z = 1/Oh$ (Oh – это число Онезорджа, вычисляемое по уравнению (3)), впервые определенное Фроммом, широко используется для оценки пригодности функциональных чернил для печати IJP:

$$We = \frac{v^2 \rho d}{\gamma} \quad (1)$$

$$Re = \frac{v \rho d}{\eta} \quad (2)$$

$$oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\eta}{\sqrt{\gamma \rho d}} \quad (3)$$

Где: ρ – плотность чернил,
 η – вязкость чернил,
 γ – поверхностное натяжение чернил,
 d – характерная длина (обычно диаметр отверстия),
 v – скорость полета капли.

Считается, что капли стабильно выбрасываются при $1 < Z < 10$. При низких значениях Z вязкость будет препятствовать отделению капель от дюзы, что приведет к образованию длинных тонких хвостов и увеличению периода времени для выброса одной капли. В свою очередь, при высоких значениях Z первичная капля, вероятно, будет сопровождаться несколькими каплями-сателлитами.

С одной стороны, диспергированные частицы размером менее $\approx 1/50$ диаметра отверстия (обычно 10-100 мкм) могут в значительной степени уменьшить вероятность засорения. С другой стороны, дисперсность частиц также тесно связана со скоростью осаждения, о чем говорит закон Стокса (уравнение (4)), полученный с учетом движения сферических частиц в низкотемпературной жидкости:

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho_f) g d^2}{18 \eta_0} (1 - \varphi)^n \quad (4)$$

Где: V_s – скорость осаждения,
 ρ_p и ρ_f – плотности частиц и базового материала соответственно,
 g – гравитационная постоянная,

Experiments and discussion

A balance of viscosity and surface tension should be guaranteed to prevent the formation of satellite droplets or ink mist. The dimensionless number $Z = 1/Oh$ (Oh is the Ohnesorge number, calculated by Equation (3)) first defined by Fromm [70] is widely used to evaluate the printability of functional inks for IJP:

Where:

ρ is the density of the ink,
 η is the viscosity of the ink,
 γ is the surface tension of the ink,
 d is the characteristic length (typically the diameter of the

orifice),

v is the velocity of the droplet in flight.

Droplets are stably ejected when $1 < Z < 10$. At low values of Z , the viscous force will prevent droplet separation from the orifice, resulting in long thin tails and an extended period of time for single droplet ejection. In turn, at high values of Z , the primary droplet would likely be accompanied by several satellite droplets.

On the one hand, dispersed particles smaller than $\approx 1/50$ of the orifice diameter (typically 10–100 μm) can largely reduce the occurrence of clogging. On the other hand, the size of dispersed particles is also strongly associated with the sedimentation velocity, as shown in Stokes law (Equation (4)) derived considering the movement of spherical particles in a base fluid:

Where: V_s is the sedimentation velocity,
 ρ_p and ρ_f are the densities of the particle and base fluid, respectively,
 g is the gravitational constant, d is the particle diameter,

d – диаметр частиц,
 η_0 – вязкость базового материала,
 φ – объемная доля твердого вещества (частиц),
 n равно 4,75, когда диаметр частиц больше, чем 2 мкм и 5,25 для субмикронных.

Желательно получить функциональные чернила с максимально возможной плотностью (φ) и минимально возможной вязкостью (η) для печати однородных, плотных, с низкой усадкой и без дефектов изделий. Для определения зависимости $\varphi - \eta$ были предложены различные модели, среди которых наиболее широко используется модель Кригера–Догерти

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_m}\right)^{-B\varphi_m} \quad (5)$$

Где: η – вязкость чернил,
 η_0 – вязкость основы,
 φ – объемная доля твердого вещества,
 φ_m – максимальная объемная доля твердого вещества,
 B – «коэффициент Эйнштейна» или «внутренняя вязкость» со значением 2,5.

Авторы данной работы считают, что распределение по размерам и объемную долю наполнителя при синтезе чернил следует определять на основе вышеуказанных факторов.

Этапы создания изделий методами HTCC и LTCC представлены на рис. 1.

Сравнение различных технологий мультиматериальной 3d-печати, применяемой для печати керамических изделий представлены на рис. 2-6.

Разработанная авторами в лаборатории «Аддитивное производство электроники» РТУ МИРЭА модифицированная установка DIW с УФ-подсветкой и ИК-лампой для технологий мультиматериальной 3d-печати, представлена на рис. 7. На рис. 8 представлен разработанный в лаборатории «Аддитивное производство электроники» тензорезистивный датчик, напечатанный из электропроводящего филамента, наполненного углеродными нанотрубками (УНТ).

η_0 is the base fluid viscosity,
 φ is the solid (particle) volume fraction,
 n is 4.75 when the particle diameter is greater than 2 μm and 5.25 for submicron.

A functional ink with the highest possible density is desirable (φ) and lowest possible viscosity (η) for printing uniform, dense, low shrinkage, and defect-free bodies. Various models have been proposed to determine the $\varphi - \eta$ relationship. Among them, the Krieger–Dougherty model is the most extensively used,

Where: η is the viscosity of the ink,
 η_0 is the viscosity of the base,
 φ is the volume fraction of the solid,
 φ_m is the maximum volume fraction of the solid,
 B is the "Einstein coefficient" or "internal viscosity" with a value of 2.5.

The authors of this work believe that the size distribution and volume fraction of the filler during ink synthesis should be determined based on the above factors.

The stages of creating products using the HTCC and LTCC methods are presented in Fig. 1.

A comparison of various multimaterial 3D printing technologies used for printing ceramic products is presented in Fig. 2-6.

The modified DIW unit with UV-illumination and IR-lamp for multi-material 3d-printing technologies developed by the authors in the laboratory "Additive Manufacturing of Electronics" of RTU MIREA is presented in Fig. 7. Fig. 8 shows a strain-gauge sensor developed in the laboratory "Additive Manufacturing of Electronics", printed from an electrically conductive filament filled with carbon nanotubes (CNT).

РИСУНОК 1

ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДАМИ HTCC И LTCC



Figure 1

The stages of creating products using HTCC and LTCC methods

РИСУНОК 2

СХЕМЫ CJP ТЕХНОЛОГИИ И DOD ТЕХНОЛОГИИ

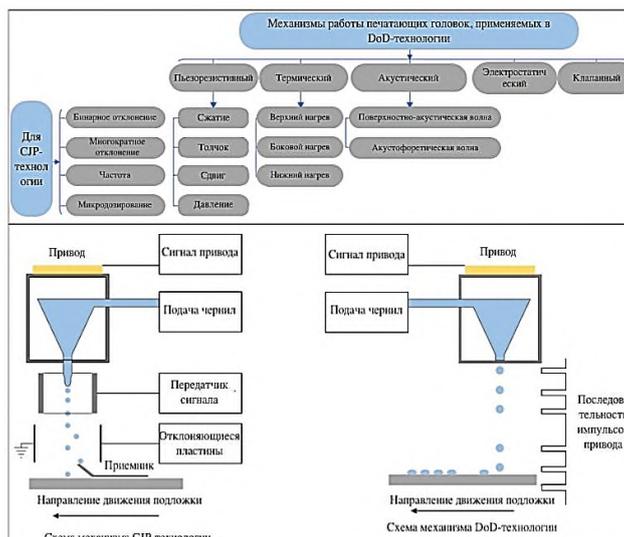


Figure 2

Schemes of CJP technology and DOD technology

РИСУНОК 3
ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ СТРУЙНЫХ ПРИНТЕРОВ DOD С ПЕЧАТАЮЩИМИ ГОЛОВКАМИ С РАЗЛИЧНЫМИ ПРИВОДНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

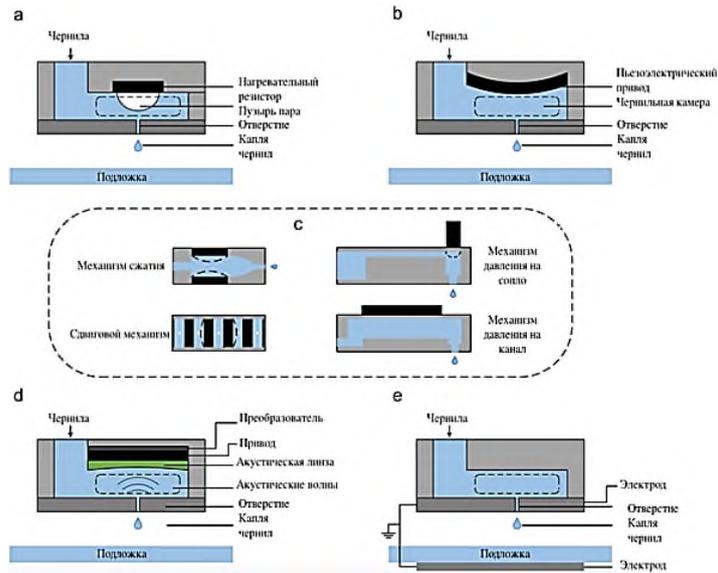


Figure 3
Principles of operation of DOD inkjet printers with printing machines with various drive mechanisms

РИСУНОК 4
ПРИНЦИП РАБОТЫ AJP ТЕХНОЛОГИИ МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ

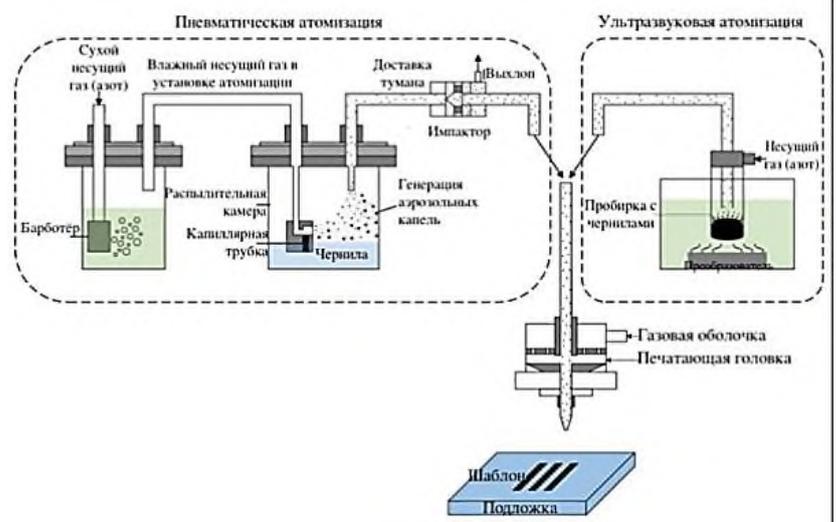


Figure 4
Working principle of AJP multimaterial 3D printing technology

РИСУНОК 5
МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

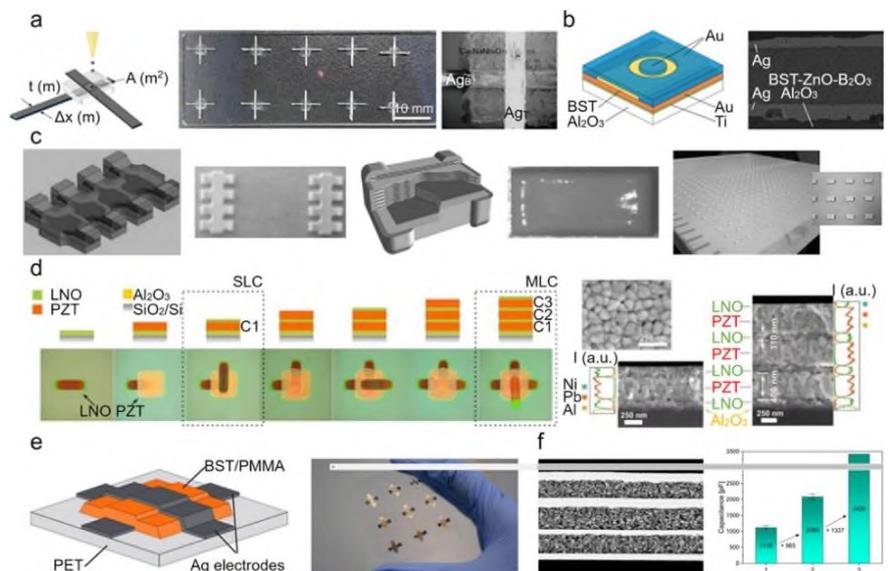


Figure 5
Multimaterial 3D printing of ceramic capacitors

РИСУНОК 6

МУЛЬТИМАТЕРИАЛЬНАЯ 3D-ПЕЧАТЬ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК

Figure 6

Multimaterial 3D printing of ceramic substrates

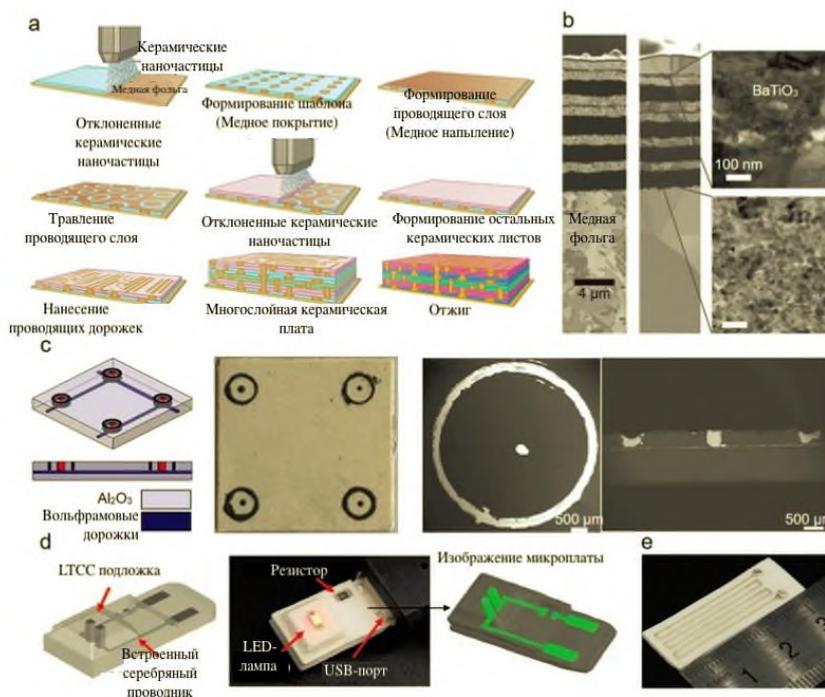
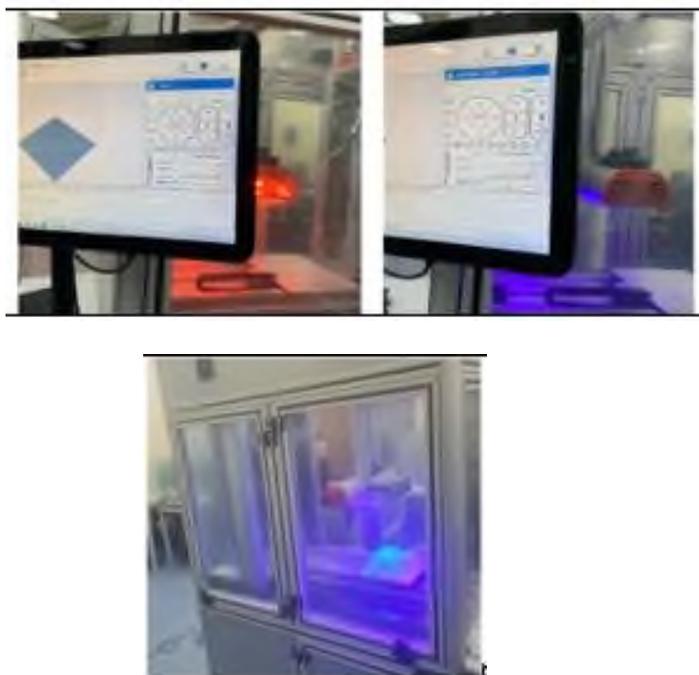


РИСУНОК 7

РАЗРАБОТАННАЯ МОДИФИЦИРОВАННАЯ УСТАНОВКА DIW С УФ-ПОДСВЕТКОЙ И ИК-ЛАМПОЙ

Figure 7

Developed modified DIW unit with UV illumination and IR lamp



Заключение

Мультиматериальная 3D-печать предлагает отличный инструмент для непосредственного изготовления изделий с разнообразием материалов, удовлетворяющих конкретным требованиям, таким как геометрическая сложность, микромасштаб, многофункциональность, время выполнения работ и экономическая эффективность, а также позволяет создавать градиентные структуры с настраиваемыми диэлектрическими или механическими свойствами. Несмотря на достижения в области мультиматериальной 3D-печати за последние несколько лет, по-прежнему существует ряд проблем, требующих

Conclusions

Multimaterial 3D printing offers an excellent tool for the direct manufacture of products with a variety of materials that meet specific requirements such as geometric complexity, micro-scale, versatility, work time and cost efficiency, and also allows you to create gradient structures with customizable dielectric or mechanical properties. Despite the advances in the field of multimaterial 3D printing over the past few years, there are still a number of problems that need to be solved. Among these existing technologies, FDM 3D printing is the easiest to implement; however, insufficient surface quality and printing resolution limit its use today to

решения. Среди этих существующих технологий мультиматериальной 3D-печати FDM является наиболее простой в реализации; однако не достаточное качество поверхности и разрешение печати ограничивают её применение сегодня рядом областей, в которых не требуются очень высокие точность и качество. При этом наиболее часто используемый форм-фактор в виде нитей даёт огромное поле для исследований в области создания композиционных материалов.

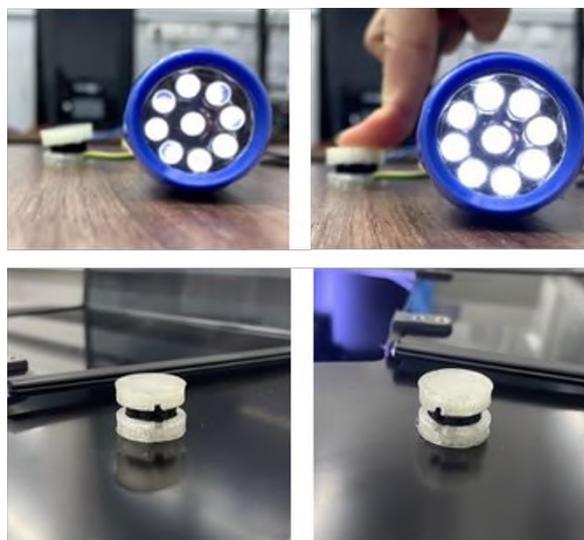
a number of areas in which very high accuracy and quality are not required. At the same time, the most commonly used form factor in the form of threads provides a huge field for research in the field of creating composite materials.

РИСУНОК 8

РАБОТАЮЩИЙ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЙ ДАТЧИК, НАПЕЧАТАННЫЙ ИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕГО ФИЛАМЕНТА, НАПОЛНЕННОГО УНТ

Figure 8

Disassembled strain gauge sensor printed from an electrically conductive filament filled with CNTs



DIW обладает наибольшей адаптируемостью материала и обеспечивает лучшее качество поверхности и разрешение печати, по сравнению с FDM, особенно при использовании микронасосов; однако это влияет на производительность. MJ больше подходит для изготовления миниатюрных деталей и субмикротонких деталей; однако разработка функциональных чернил с уникальными свойствами (например, реологическими и электрическими и механическими характеристиками) важна, и это остается сложной задачей для MJ.

Технологии, основанные на VP, в теории способны дать лучшее решение в части мультиматериальной 3D-печати, открывая множество путей развития в создании суспензий.

Специализированная электроника была ключевым фактором развития технологий мультиматериальной 3D-печати и, возможно, продолжит оставаться коммерческой мотивацией. В большинстве случаев при использовании этих технологий для изготовления печатных плат и электронных компонентов чаще используются полимерные материалы, которые работают лучше, чем керамические материалы. Основная причина заключается в том, что при использовании керамических материалов зеленые корпуса, напечатанные на мультиматериальном 3D-принтере, необходимо очищать и отжигать при различных режимах.

Необходимы постоянные усилия по разработке новых, передовых и разнообразных материалов для поддержания роста и внедрения мультиматериальной 3D-печати функциональных керамических устройств. Необходимо использовать инновационные и универсальные подходы к мультиматериальной 3D-печати с высоким разрешением, высокой точностью и экономичностью.

DIW has the greatest adaptability of the material and provides better surface quality and print resolution compared to FDM, especially when using micro pumps; however, this affects performance. MJ is more suitable for the manufacture of miniature parts and submicrothin parts; however, the development of functional inks with unique properties (e.g. rheological and electrical and mechanical characteristics) is important, and it remains a challenge for MJ.

VP-based technologies, in theory, can provide the best solution in terms of multimaterial 3D printing, opening up many ways of development in the creation of suspensions.

Specialized electronics has been a key factor in the development of 3D multimaterial printing technologies and may continue to be a commercial motivation. In most cases, when using these technologies for the manufacture of printed circuit boards and electronic components, polymer materials are more often used, which work better than ceramic materials. The main reason is that when using ceramic materials, green enclosures printed on a multimaterial 3D printer must be cleaned and annealed under various modes.

Continuous efforts are needed to develop new, advanced and diverse materials to support the growth and adoption of multimaterial 3D printing of functional ceramic devices. It is necessary to use innovative and universal approaches to multi-material 3D printing with high resolution, high accuracy and cost-effectiveness.

Литература:

References:

1. Wolf, A.; Rosendahl, P.L.; Knaack, U. Additive manufacturing of clay and ceramic building components. *Autom. Constr.* 2021, 133, 103956.
2. He, Q.; Jiang, J.; Yang, X.; Zhang, L.; Zhou, Z.; Zhong, Y.; Shen, Z. Additive manufacturing of dense zirconia ceramics by fused deposition modeling via screw extrusion. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2020, 41, 1033–1040.
3. Wang, F.; Li, Z.; Lou, Y.; Zeng, F.; Hao, M.; Lei, W.; Wang, X.; Wang, X.; Fan, G.; Lu, W. Stereolithographic additive manufacturing of Luneburg lens using Al₂O₃-based low sintering temperature ceramics for 5G MIMO antenna. *Addit. Manuf.* 2021, 47, 102244.
4. Liu, K.; Zhou, C.; Hu, J.; Zhang, S.; Zhang, Q.; Sun, C.; Shi, Y.; Sun, H.; Yin, C.; Zhang, Y.; et al. Fabrication of barium titanate ceramics via digital light processing 3D printing by using high refractive index monomer. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2021, 41, 5909–5917.
5. Khan, A.; Rahman, K.; Ali, S.; Khan, S.; Wang, B.; Bermak, A. Fabrication of circuits by multi-nozzle electrohydrodynamic inkjet printing for soft wearable electronics. *J. Mater. Res.* 2021, 36, 3568–3578.
6. Karim, N.; Afroj, S.; Tan, S.; Novoselov, K.S.; Yeates, S.G. All Inkjet-Printed Graphene-Silver Composite Ink on Textiles for Highly Conductive Wearable Electronics Applications. *Sci. Rep.* 2019, 9, 8035.
7. Kant, T.; Shrivastava, K.; Tapadia, K.; Devi, R.; Ganesan, V.; Deb, M.K. Inkjet-printed paper-based electrochemical sensor with gold nano-ink for detection of glucose in blood serum. *New J. Chem.* 2021, 45, 8297–8305.
8. Khan, S.; Nguyen, T.; Lubej, M.; Thiery, L.; Vairac, P.; Briand, D. Low-power printed micro-hotplates through aerosol jetting of gold on thin polyimide membranes. *Microelectron. Eng.* 2018, 194, 71–78.
9. Lim, S.; Joyce, M.; Fleming, P.D.; Aijazi, A.T.; Atashbar, M. Inkjet Printing and Sintering of Nano-Copper Ink. *J. Imaging Sci. Technol.* 2013, 57, 50506-1–50506-7.
10. Khan, A.; Rahman, K.; Kim, D.S.; Choi, K.H. Direct printing of copper conductive micro-tracks by multi-nozzle electrohydrodynamic inkjet printing process. *J. Mater. Process. Technol.* 2011, 212, 700–706.
11. Majee, S.; Karlsson, M.C.F.; Wojcik, P.J.; Sawatdee, A.; Mulla, M.Y.; Alvi, N.U.H.; Dyreklev, P.; Beni, V.; Nilsson, D. Low temperature chemical sintering of inkjet-printed Zn nanoparticles for highly conductive flexible electronic components. *npj Flex. Electron.* 2021, 5, 32.
12. Mahajan, B.K.; Ludwig, B.; Shou, W.; Yu, X.; Fregene, E.; Xu, H.; Pan, H.; Huang, X. Aerosol printing and photonic sintering of bioresorbable zinc nanoparticle ink for transient electronics manufacturing. *Sci. China Inf. Sci.* 2018, 61, 060412.
13. Singh, A.; Katiyar, M.; Garg, A. Understanding the formation of PEDOT:PSS films by ink-jet printing for organic solar cell applications. *RSC Adv.* 2015, 5, 78677–78685.
14. Zips, S.; Grob, L.; Rinklin, P.; Terkan, K.; Adly, N.Y.; Weiß, L.J.K.; Mayer, D.; Wolfrum, B. Fully Printed μ -Needle Electrode Array from Conductive Polymer Ink for Bioelectronic Applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 11, 32778–32786.
15. Yang, C.-Y.; Stoeckel, M.-A.; Ruoko, T.-P.; Wu, H.-Y.; Liu, X.; Kolhe, N.B.; Wu, Z.; Puttison, Y.; Musumeci, C.; Massetti, M.; et al. A high-conductivity n-type polymeric ink for printed electronics. *Nat. Commun.* 2021, 12, 2354.
16. McKerricher, G.; Maller, R.; Mohammad, V.; McLachlan, M.A.; Shamim, A. Inkjet-printed thin film radio-frequency capacitors based on sol-gel derived alumina dielectric ink. *Ceram. Int.* 2017, 43, 9846–9853.
17. Lim, J.; Jung, H.; Baek, C.; Hwang, G.-T.; Ryu, J.; Yoon, D.; Yoo, J.; Park, K.-I.; Kim, J.H. All-inkjet-printed flexible piezoelectric generator made of solvent evaporation assisted BaTiO₃ hybrid material. *Nano Energy* 2017, 41, 337–343.
18. Craton, M.T.; He, Y.; Roch, A.; Chahal, P.; Papapolymerou, J. Additively manufactured interdigitated capacitors using barium titanate nanocomposite inks. In *Proceedings of the 2019 49th European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, 1–3 October 2019; pp. 488–491.
19. Rahul, S.; Balasubramanian, K.; Venkatesh, S. Optimizing inkjet printing process to fabricate thick ceramic coatings. *Ceram. Int.* 2017, 43, 4513–4519.
20. Özkol, E.; Wätjen, A.M.; Bermejo, R.; Deluca, M.; Ebert, J.; Danzer, R.; Telle, R. Mechanical characterisation of miniaturised direct inkjet printed 3Y-TZP specimens for microelectronic applications. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2010, 30, 3145–3152.
21. Zhu, Z.; Zhang, J.; Zhou, Z.; Ning, H.; Cai, W.; Wei, J.; Zhou, S.; Yao, R.; Lu, X.; Peng, J. A Simple, Low-Cost Ink System for Drop-on-Demand Printing High Performance Metal Oxide Dielectric Film at Low Temperature. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 11, 5193–5199. [PubMed]
22. Awais, M.N.; Kim, H.C.; Doh, Y.H.; Choi, K.H. ZrO₂ flexible printed resistive (memristive) switch through electrohydrodynamic printing process. *Thin Solid Films* 2013, 536, 308–312.
23. Huckaba, A.J.; Lee, Y.; Xia, R.; Paek, S.; Bassetto, V.C.; Oveisi, E.; Lesch, A.; Kinge, S.; Dyson, P.J.; Girault, H.; et al. Inkjet-Printed Mesoporous TiO₂ and Perovskite Layers for High Efficiency Perovskite Solar Cells. *Energy Technol.* 2018, 7, 317–324.
24. Padrón-Hernández, W.; Ceballos-Chuc, M.C.; Pourjafari, D.; Oskam, G.; Tinoco, J.C.; Martínez-López, A.; Rodríguez-Gattorno, G. Stable inks for inkjet printing of TiO₂ thin films. *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2018, 81, 75–81.
25. Mikolajek, M.; Friederich, A.; Kohler, C.; Rosen, M.; Rathjen, A.; Krüger, K.; Binder, J.R. Direct Inkjet Printing of Dielectric Ceramic/Polymer Composite Thick Films. *Adv. Eng. Mater.* 2015, 17, 1294–1301.
26. Wu, X.; Fei, F.; Chen, Z.; Su, W.; Cui, Z. A new nanocomposite dielectric ink and its application in printed thin-film transistors. *Compos. Sci. Technol.* 2014, 94, 117–122.
27. Singlard, M.; Aimable, A.; Lejeune, M.; Dossou-Yovo, C.; Poncelet, M.; Noguera, R.; Modes, C. Aqueous suspensions of glass silicate dielectric powders for ink-jet printing applications. *Powder Technol.* 2014, 266, 303–311.
28. Zhang, F.; Tuck, C.; Hague, R.; He, Y.; Saleh, E.; Li, Y.; Sturges, C.; Wildman, R. Inkjet printing of

polyimide insulators for the 3D printing of dielectric materials for microelectronic applications. *J. Appl. Polym. Sci.* 2016, 133, 43361–43371.

29. Yi, L.; Torah, R.; Beeby, S.; Tudor, J. An all-inkjet printed flexible capacitor on a textile using a new poly(4-vinylphenol) dielectric ink for wearable applications. In *Proceedings of the Sensors*, Taipei, Taiwan, 28–31 October 2012.

30. Jung, C.; Tang, X.; Kwon, H.-J.; Wang, R.; Oh, S.M.; Ye, H.; Jeong, Y.R.; Jeong, Y.J.; Kim, S.H. Electrohydrodynamic-Printed Polyvinyl Alcohol-Based Gate Insulators for Organic Integrated Devices. *Adv. Eng. Mater.* 2022, 24, 2100900.

31. Arango, I.; Cañas, M. Dynamic analysis of a recirculation system of micro functional fluids for ink-jet applications. *Microsyst. Technol.* 2017, 23, 1485–1494.

32. Seidel, J.; Claussen, N.; Rödel, J. Reliability of alumina ceramics: Effect of grain size. *J. Eur. Ceram. Soc.* 1995, 15, 395–404.

33. Zhu, Z.; Gong, Z.; Qu, P.; Li, Z.; Rasaki, S.A.; Liu, Z.; Wang, P.; Liu, C.; Lao, C.; Chen, Z. Additive manufacturing of thin electrolyte layers via inkjet printing of highly-stable ceramic inks. *J. Adv. Ceram.* 2021, 10, 279–290.

34. Wätjen, A.M.; Gingter, P.; Kramer, M.; Telle, R. Novel Prospects and Possibilities in Additive Manufacturing of Ceramics by means of Direct Inkjet Printing. *Adv. Mech. Eng.* 2014, 6, 141346.

35. Secor, E.B. Guided in kind process design for aerosoljet printing based on an nular drying effects. *Flex. Print. Electron.* 2018,3, 035007.

36. Tarabella, G.; Vurro, D.; Lai, S.; D'Angelo, P.; Ascari, L.; Iannotta, S. Aerosoljet printing of PEDOT: PSS for large reconfigurable electronics. *Flex. Print. Electron.* 2020, 5, 014005.

37. Akhatov, I.; Hoey, J.; Swenson, O.; Schulz, D. Aerosol focusing in micro-capillaries: Theory and experiment. *J. Aerosol Sci.* 2008, 39, 691–709.

38. Xu, M.; Lewis, J.A. Phase Behavior and Rheological Properties of Polyamine-Rich Complexes for Direct Write Assembly. *Langmuir* 2007, 23, 12752–12759. [PubMed]

39. Betancourt, N.; Chen, X. Review of extrusion based multimaterial bioprinting processes. *Bioprinting* 2022, 25, e00189.

40. Poltue, T.; Karuna, C.; Khruaduangkham, S.; Sehanam, S.; Promopatum, P. Design exploration of 3D-printed triplyperiodic minimal surface scaffolds for bone implants. *Int. J. Mech. Sci.* 2021, 211, 106762.

41. Han, D.; Yang, C.; Fang, N.X.; Lee, H. Rapid multi-material 3D printing with projection micro-stereolithography using dynamic fluidic control. *Addit. Manuf.* 2019, 27, 606–615.

42. Fu, Y.; Zhang, P.; Li, B.; Zhang, B.; Yu, Y.; Shen, Z.; Zhang, X.; Wu, J.; Nan, C.; Zhang, S. Inkjet Printing of Perovskite Nanosheets for Microcapacitors. *Adv. Electron. Mater.* 2021, 7, 2100402.

43. Friederich, A.; Köhler, C.; Nikfalazar, M.; Wiens, A.; Jakoby, R.; Bauer, W.; Binder, J.R. Inkjet-Printed Metal-Insulator-Metal Capacitors for Tunable Microwave Applications. *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 2015, 12, E164–E173.

44. Dossou-Yovo, C.; Mouenot, M.; Beaudrouet, E.; Bessaudou, M.; Bernardin, N.; Charifi, F.; Coquet, C.; Borrella, M.; Noguera, R.; Modes, C.; et al. Inkjet Printing Technology: A Novel Bottom-up Approach for Multilayer Ceramic Components and High Definition Printed Electronic Devices. *J. Microelectron. Electron. Packag.* 2012, 9, 187–198.

45. Matavž, A.; Bencan, A.; Kovac, J.; Chung, C.; Jones, J.L.; Troler-McKinstry, S.; Malic, B.; Bobnar, V. Additive Manufacturing of Ferroelectric-Oxide Thin-Film Multilayer Devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 11, 45155–45160. [PubMed]

46. Reinheimer, T.; Azmi, R.; Binder, J.R. Polymerizable Ceramic Ink System for Thin Inkjet-Printed Dielectric Layers. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019, 12, 2974–2982.

47. Hirao, T.; Hamada, S. Novel Multi-Material 3-Dimensional Low-Temperature Co-Fired Ceramic Base. *IEEE Access* 2019, 7, 12959–12963.

48. Imanaka, Y.; Amada, H.; Kumasaka, F.; Takahashi, N.; Yamasaki, T.; Ohfuchi, M.; Kaneta, C. Nanoparticulated Dense and Stress-Free Ceramic Thick Film for Material Integration. *Adv. Eng. Mater.* 2013, 15, 1129–1135.

49. Raynaud, J.; Pateloup, V.; Bernard, M.; Gourdonnaud, D.; Passerieux, D.; Cros, D.; Madrangeas, V.; Michaud, P.; Chartier, T. Hybridization of additive manufacturing processes to build ceramic/metal parts: Example of HTCC. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2021, 41, 2023–2033.

50. Oh, Y.; Bharambe, V.; Mummareddy, B.; Martin, J.; McKnight, J.; Abraham, M.A.; Walker, J.M.; Rogers, K.; Conner, B.; Cortes, P.; et al. Microwave dielectric properties of zirconia fabricated using NanoParticle Jetting™. *Addit. Manuf.* 2019, 27, 586–594

51. Lee, J.-Y.; Choi, C.-S.; Hwang, K.-T.; Han, K.-S.; Kim, J.-H.; Nahm, S.; Kim, B.-S. Optimization of Hybrid Ink Formulation and IPL Sintering Process for Ink-Jet 3D Printing. *Nanomaterials* 2021, 11, 1295.

52. Castro, J.; Rojas, E.; Ross, A.; Weller, T.; Wang, J. High loss low loss thermoplastic composites for used Deposition Modeling and their application to 3D-printed Kuband antennas. In *Proceedings of the 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, San Francisco, CA, USA, 22–27 May 2016; pp. 1–4.

53. Castro, J.; Rojas, E.; Weller, T.; Wang, J. High -k and low loss polymer composites with co-fired Nd and Mg Titanates for 3DRF and microwave printed devices: Fabrication and characterization. In *Proceedings of the 2015 IEEE 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, Cocoa Beach, FL, USA, 13–15 April 2015; pp. 1–5.

54. Castro, J.; Rojas-Nastrucci, E.A.; Ross, A.; Weller, T.M.; Wang, J. Fabrication, Modeling, and Application of Ceramic Thermoplastic Composites for Fused Deposition Modeling of Microwave Components. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2017, 65, 2073–2084.

55. Mikolajek, M.; Reinheimer, T.; Bohn, N.; Köhler, C.; Hoffmann, M.J.; Binder, J.R. Fabrication and Characterization of Fully Inkjet-Printed Capacitors Based on Ceramic/Polymer Composite Dielectrics on Flexible Substrates. *Sci. Rep.* 2019, 9, 13324.

56. Lim, J.; Kim, J.; Yoon, Y.J.; Kim, H.; Yoon, H.G.; Lee, S.-N.; Kim, J. All inkjet printed Metal Insulator Metal (MIM) capacitor. *Curr. Appl. Phys.* 2012, 12, e14–e17.

57. Reinheimer, T.; Baumann, V.; Binder, J.R. Fabrication of Flexible Multilayer Composite Capacitors Using Inkjet Printing. *Nanomaterials* 2020, 10, 2302.

58. Wang, P.; Li, J.; Wang, G.; He, L.; Yu, Y.; Xu, B. Multimaterial Additive Manufacturing of LTCC Matrix

and Silver Conductors for 3D Ceramic Electronics. *Adv. Mater. Technol.* 2022, 7, 2101462

59. Raynaud, J.; Pateloup, V.; Bernard, M.; Gourdonnaud, D.; Passerieux, D.; Cros, D.; Madrangeas, V.; Chartier, T. Hybridization of additive manufacturing processes to build ceramic/metal parts: Example of LTCC. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2020, 40, 759–767.

Работа выполнена в рамках Государственного задания 075-01528-23-02 от 22.02.2023 «Исследования и разработки методов аддитивного производства электроники» (руководитель – Рагуткин Александр Викторович.)

Рагуткин Александр Викторович – советник ректора РТУ МИРЭА по науке, доктор технических наук, РТУ МИРЭА, *E-mail:* ragutkin@mirea.ru.

Юшин Денис Игоревич – заместитель заведующего лабораторией «Аддитивное производство электроники», научный сотрудник, РТУ МИРЭА

E-mail: yushin@mirea.ru (автор для связи)

Нетреба Анастасия Юрьевна – инженер лаборатории «Аддитивное производство электроники», научный сотрудник, РТУ МИРЭА, *E-mail:* netreba@mirea.ru

Санжаровский Александр Юрьевич – Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,

E-mail: a.sanzharovskiy@eipc.center

Вклад авторов: Рагуткин А.В. - идея, научное руководство, научное редактирование статьи; Юшин Д.И. – разработка методик, обработка материала, написание статьи; Нетреба А.Ю. – разработка методик, обработка материала, написание статьи; Санжаровский А.Ю. – обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ragutkin Alexander Viktorovich – Advisor to the Rector of RTU MIREA for Science, Doctor of Technical Sciences, RTU MIREA, *E-mail:* ragutkin@mirea.ru

Denis Igorevich Yushin – Deputy Head of the laboratory "Additive Manufacturing of Electronics", Researcher, RTU MIREA

E-mail: yushin@mirea.ru (the author is for communication)

Netreba Anastasia Yuryevna – engineer of the laboratory "Additive Manufacturing of Electronics", researcher, RTU MIREA, *E-mail:* netreba@mirea.ru

Sanzharovskiy Alexander Yurievich – Research Institute "Environmental Industrial Policy Centre"

E-mail: a.sanzharovskiy@eipc.center

Contribution of the author: A.V. Ragutkin - idea, scientific guidance, scientific editing of the article; D.I. Yushin - development of methods, processing of material, writing of the article; A.Y. Netreba. - development of methods, material processing, article writing; Sanzharovskiy A.Yu. -processing of material, writing the article.

The authors declare that they have no conflict of interest.