

## ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИКИ

Захаров А.И., Безменов А.И., Андреев Д.В.

*В статье приводится характеристика разных видов цифровых технологий, в том числе аддитивных, используемых в производстве керамики. Дана классификация керамических изделий по видам и способам формования. Показаны перспективы использования описанных технологий.*

**Ключевые слова:** керамика, цифровые технологии, аддитивные технологии, цифровая печать

Термин «цифровые технологии», определяющий новый, более высокий уровень автоматизации производства, ранее применялся в электронике, прежде всего компьютерной технике, а также в различных областях электротехники: в робототехнике, измерительных приборах и др. В последнее время этот термин используется не только в разных областях техники, но и в экономике, и в социальной жизни [1].

Если раньше речь шла о компьютеризации производства, позволяющей достигать не только увеличения производительности и экономии человеческих ресурсов, то в настоящее время многие технологические процессы, начиная от проектирования изделий и заканчивая контролем готовой продукции, осуществляются с широким использованием средств программирования и новых специализированных типов оборудования. В первом отечественном справочнике по наилучшим доступным технологиям в производстве керамики [2] цифровые технологии выделены, как один из перспективных способов ресурсосбережения и экологической эффективности производства.

Цель статьи – оценка преимуществ использования цифровых технологий на современном этапе и формулировка проблем, которые требуют решения при их внедрении.

Подразумевая под цифровыми технологиями в производстве керамики способы проектирования и производства керамических изделий, основанные на применении специализированных компьютерных программ, позволяющих достичь нового уровня процесса или нового уровня качества изделий, можно предложить их следующую классификацию:

- технологии проектирования изделий;
- технологии быстрого прототипирования;
- технологии формования (аддитивные технологии);
- технологии декорирования (цифровая печать).

Производство керамических изделий отличается разнообразием материалов, способов подготовки сырья, методов формования и обработки. Керамические материалы конкурируют между собой или с другими материалами в конкретных областях применения, что требует тщательного подхода к проектированию изделий, для оптимального выбора состава и метода производства.

На стадии проектирования изделий необходимо использовать САЕ-программы, позволяющие рассчитать поведение материалов в условиях эксплуатации, оптимизировать форму изделий [3]. Особенно они эффективны для изделий, работающих в экстремальных условиях: при воздействии высоких температур, механических и других нагрузок.

Применение таких расчетов также оправдано для дорогостоящих изделий уникальных форм и габаритов, т. к. производство их опытных образцов и натурные испытания весьма дороги. Среди подобных задач – проектирование машиностроительных деталей, а также изделий, используемых в атомной промышленности, космической и оборонной технике. Проблема применения САЕ-программ заключается не только в их относительно высокой стоимости, но и в том, что для проведения расчетов необходимы знания комплекса свойств и их зависимостей от внешних условий, прежде всего, от температуры. Составление баз данных определяющих свойства керамических материалов (в отсутствии литературных данных) возможно только при использовании испытательных стендов и проведения отдельных исследований. Выигрыш использования САЕ-программ – возможность моделирования составов и конструирования форм изделий в достаточно широкой области.

Наиболее широко цифровые технологии в производстве керамических изделий нашли применение как основа быстрого прототипирования [4]. Существенный выигрыш во времени изготовления формующей оснастки в случае использования быстрого прототипирования основан на исключении таких технологических операций, как изготовление черновых и чистовых моделей и капов (Рис.1).

Технологии быстрого прототипирования по началу включали в себя как технологии «вычитания» (субтрактивные) – фрезерная или иная обработка модельных и формовочных составов по построенной 3D-модели изделия для изготовления моделей или рабочих форм, так и аддитивные технологии «сложения» – 3D-печать моделей или форм. Для успешного применения таких технологий необходимы не только программное обеспечение и специальное оборудования, но и грамотный выбор объектов моделирования и изготовления. Применительно к технологии керамики наиболее рациональным объектом использования быстрого прототипирования являются изделия сложной формы широкого ассортимента, например, керамическая посуда, выпускаемая большими тиражами. Изготавливать модели и формы из гипса и пластика по традиционной технологии с большой долей ручного труда высококвалифицированных форматоров (специалистов, обладающих образованием скульптора и знающих технологию керамики), для ряда изделий неэффективно, тогда как применение станков послужит экономии средств, времени и обеспечит высокое качество поверхности оснастки.



Рисунок 1 – Схемы изготовления технологической оснастки традиционным способом (а) и способом быстрого прототипирования (б)

В отличие от субтрактивных технологий аддитивные технологии (АТ), построенные на поэлементном наслаивании материала, дают возможность не только и не столько изготовить формовочную оснастку, но и отформовать полуфабрикат или, в случае селективного лазерного спекания, получить керамическое изделие [5]. Таким образом, сфера применения АТ в производстве керамики не ограничивается быстрым прототипированием, а включает в себя формование и

иногда обжиг. Явным преимуществом АТ является отсутствие формовочной оснастки, т. к. формование осуществляется порциями материала (поэлементно) на движущей подставке.

Методы АТ или, как часто их называют, технологий 3D-печати разнообразны (табл.1, рис.2), несомненный интерес для производства керамики представляет печать с использованием порошков, паст или суспензий [6-8].

Таблица 1 – Основные способы 3D-формования

Материалы	Технология	Сущность способа
Термопластики, используемые в качестве основных или в качестве связки	Экструзия	Непрерывное наслаивание полимерными нитями, подплавленными в экструдерах
	Многоструйная экструзия	Построение послойной модели с помощью печатной головки с множеством сопел
	Стереолитография	Наслаивание участками полимера, отверждаемого под действием ультрафиолетового лазерного луча
Металлы в виде проволоки	Электронно-лучевая плавка	Наплавление электронными пучками в условиях вакуумной камеры
Термопластики, металлы, стекло, керамика в виде порошка	Селективное лазерное спекание или плавка	Последовательное спекание слоев с помощью лазеров высокой мощности или теплового излучателя
Гипс, пластики, металлические порошки, песчаные смеси	3D-принтинг	Послойное построение полуфабриката порциями материала со связкой
Бумага, металлическая фольга, пластиковая пленка	Ламинирование	Последовательное склеивание листового материала

Как видно из табл. 1, для изготовления керамических изделий можно применять большинство способов АТ, используя полимерные связки.

Для успешного применения АТ необходимо выполнить 3 условия:

1. Выбрать объект, который нерационально формовать традиционными или новыми (не включающими в себя АТ) способами.

2. Выбрать оптимальный способ печати, обеспечивающий необходимое качество изделия.

3. Изготовить или приобрести материал для печати выбранным способом.

Традиционная технология керамики отличается большим разнообразием способов формования, с помощью которых можно изготовить полуфабрикаты с минимальным количеством брака. Способы формования различны по своей производительности,

возможностям управления структурой материала и технологичности. В табл.2 представлена классификация керамических изделий по их форме. В зависимости от вида изделия можно выбрать тот способ формования, который представляется оптимальным по затратам и получаемому качеству изделия.

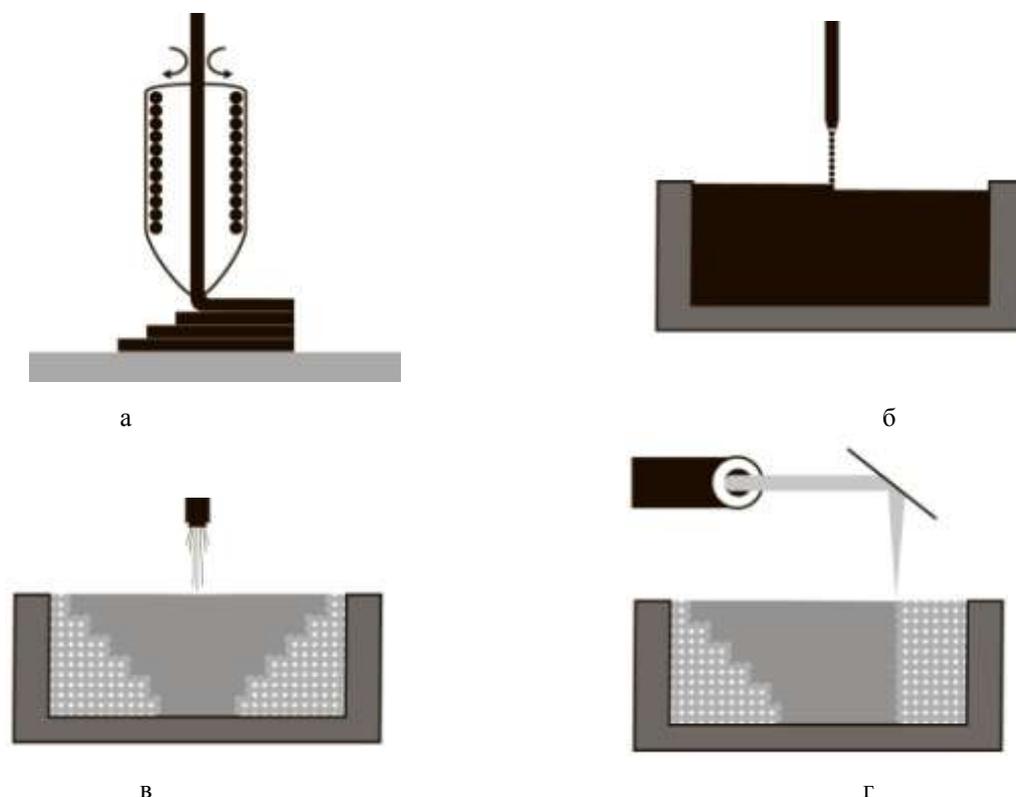


Рисунок 2 – Схемы основных способов аддитивных технологий:  
а – экструзия, б - 3D-принтинг, в – стереолитография, г – селективное лазерное спекание

Таблица 2 – Классификация керамических изделий

Виды изделий	Основные способы формования	Особенности изделий	Примеры
Облицовка	Прессование. Пластическое формование (штамповка)	Простая форма пластины	Плитка, облицовочные кирпичи, черепица,
Емкости	Шликерное литье, Пластическое формование (экструзия, раскатка)	Простая (трубка постоянного сечения) или сложная (емкость сложной формы) полая форма	Посуда, трубы, тигли
Конструкции	Горячее шликерное литье, Экструзия,	Преимущественно сложные формы	Технические детали

Объектами АТ могут быть практически все виды керамических изделий, однако изделия простых форм и больших габаритов нерационально изготавливать такими методами. Наиболее подходящими для АТ являются изделия нетрадиционной сложной формы, имеющие небольшие габариты. Однако, несмотря на

Выбор способа печати и материала в основном осуществляется по критериям доступности, а также необходимой точности формуемой заготовки, так как точность способов существенно отличается (от 20 до 150 мкм).

К материалам для АТ, как порошкам, так и композициям порошок-связка, предъявляются особые требования. Прежде всего, это достаточно высокая дисперсность частиц порошка, позволяющая получить

широкое распространение информации о 3D-печати керамических чашек, чайников и т. д. [9], существующие традиционные технологии изготовления полых изделий тел вращения имеют явное преимущество перед АТ для таких многотиражных изделий.

не только нужные технологические свойства материала для печати (вязкости, плотности, поверхностного натяжения) и качества полуфабриката, но и обеспечить необходимые физико-химические свойства керамики.

Цифровая печать силикатными красками получила распространение для декорирования керамических плиток, т. к. в полной мере позволяет использовать преимущества создания полихромного изображения на плоском изделии [10].

К таким преимуществам относятся:

1. Возможность работать с 3, 4 или 6 основными цветами, сочетания которых образуют остальные цвета.
  2. Экономия расходных материалов (чернил, трафаретов, роликов, штампов), требующихся для печати.
  3. Лучшее разрешение по сравнению с традиционными способами шелкографии, ротокolorа, флексографии.
  4. Упрощенная предпечатная подготовка.
- Технология бесконтактной цифровой печати подобна методу 3D-печати суспензиями (рис.2, б; рис.3), применяемому для формования, поэтому требования к используемым материалам также подобны.



**Рисунок 3 – Схема 3D-печати силикатными красками: контролируемая подача суспензии с помощью пьезоэлемента**

Существенная разница состоит в том, что в данном случае не нужно наслаивание печатающего материала для создания объема, необходимого при формовании.

Некоторое увлечение возможностями фотографического качества печатных изображений, получаемых способом цифровой печати, приводит к обеднению дизайна, тогда как грамотное использование разных средств декорирования позволяет достигать уникальных эффектов, мало доступных традиционными способами, в ряде случаев заменяя третий декорирующий обжиг.

Учитывая достоинства и недостатки цифровых технологий, можно отметить, что их применение в производстве керамики имеет значительные перспективы. Для стадий проектирования, формования и декорирования цифровые технологии уже вносят существенный вклад в создание материалов и изделий с новым уровнем качества. В настоящее время большое внимание уделяется решению основных проблем, с которыми связано внедрение цифровых технологий - переоснащение производства, создание материалов для печати. Отдельная задача заключается в подготовке кадров, которые могут грамотно использовать все преимущества новых способов.

#### Литература:

1. Цифровые технологии предоставляют возможности для экономического роста [Электронный ресурс] URL: <http://www.vsemirnyjbank.org/ru/news/feature/2016/04/16/digital-technologies-offer-opportunities-for-economic-growth> (дата обращения 14.12.2017)
2. Информационно-технический справочник «Производство керамических изделий» Бюро НДТ М.: 2015. 222 с.
3. САЕ\_Системы\_инженерного\_анализа. Статья: [Электронный ресурс] URL: <http://www.tadviser.ru/index.php/> (дата обращения 14.12.2017)
4. Gebhardt A. Vision Rapid Prototyping CFI/Ber/ DKG 83 (2006) N13 p.7-12
5. Kaufmann U., Ritzhaupt-Kleissl H-J., Harrysson U., Johander P Fastfab. A Process for the Free-form Fabrication of 3D Ceramic Components. CLI/ DKG 83 (2006) No.13, p.13-17
6. P. Bansal Aldo, R. Boccaccini. Ceramics and composites processing methods edited by narottam // INC., Publication Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Published simultaneously in Canada. pp. 465-467
7. K.K.B. Hon, L. Li, I.M. Hutchings Direct writing technology - Advances and developments CIRP Annals Manufacturing Technology 57 (2008) 601–620
8. С. А. Чижик Состояние и перспективы аддитивных технологий в республике Беларусь. Аддитивные

#### References:

1. Tsifrovyye tehnologii predostavlyayut vozmozhnosti dlya ekonomicheskogo rosta [Elektronnyiy resurs] URL: <http://www.vsemirnyjbank.org/ru/news/feature/2016/04/16/digital-technologies-offer-opportunities-for-economic-growth> (data obrascheniya 14.12.2017)
2. *Informatsionno-tehnicheskij spravochnik «Proizvodstvo keramicheskikh izdeliy» Byuro NDT* [Information and technical reference book "Production of ceramic products" Bureau of BAT] M.: 2015. 222 p.
3. CAE\_Sistemyi\_inzhenernogo\_analiza. Statya: [Elektronnyiy resurs] URL <http://www.tadviser.ru/index.php/> (data obrascheniya 14.12.2017)
4. Gebhardt A. Vision Rapid Prototyping CFI/Ber/ DKG 83 (2006) N13 p.7-12
5. Kaufmann U., Ritzhaupt-Kleissl H-J., Harrysson U., Johander P Fastfab. A Process for the Free-form Fabrication of 3D Ceramic Components. CLI/ DKG 83 (2006) No.13, p.13-17
6. P. Bansal Aldo, R. Boccaccini. Ceramics and composites processing methods edited by narottam // INC., Publication Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. Published simultaneously in Canada. pp. 465-467
7. K.K.B. Hon, L. Li, I.M. Hutchings Direct writing technology - Advances and developments CIRP Annals Manufacturing Technology 57 (2008) 601–620
8. Chizhik S.A. *Sostoyanie i perspektivy additivnykh tehnologiy v respublike Belarus. Additivnyye tehnologii:*

технологии: материалы и конструкции. Материалы научно-техн. конференции (Гродно 5-6 окт. 2016 г.) Нац. Академ. Наук Беларуси [и др.] редкол. А. И. Свереденок, глав. ред. [и др.] Гродно: ГрГУ, 2016. – 274 с.

9. Британские ученые изобрели новый способ 3D печати керамики [Электронный ресурс] URL: <http://www.3dindustry.ru/article/2171/8> (дата обращения 14.12.2017)

10. Requirements to Ceramic Suspensions for Inkjet Printing [Текст] / М. Mikolajek, A. Friederich, W. Bauer, J. R. Binder // Ceramic Forum International / - 2015.- №3.- С.25-29

*materialyi i konstruksii. Materialyi nauchno-tehn. konferentsii (Grodno 5-6 okt. 2016 g.) Nats. Akadem. Nauk Belarusi [i dr.] redkol. A. I. Sveredenok, glav. Red [State and prospects of additive technologies in the Republic of Belarus. Additive technologies: materials and constructions] Grodno: GrGU, 2016. – 274 p (rus).*

9. Britanskie uchenye izobreli novyyi sposob 3D pechati keramiki [Elektronnyiy resurs] URL: <http://www.3dindustry.ru/article/2171/8>(data obrascheniya 14.12.2017)

10. Requirements to Ceramic Suspensions for Inkjet Printing [Text] / M. Mikolajek, A. Friederich, W. Bauer, J. R. Binder. – Ceramic Forum International, 2015.–№3.– pp. 25-29.

---

**Захаров Александр Иванович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой Общей технологии силикатов Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д. И. Менделеева),

**E-mail:** [alezakharov@rambler.ru](mailto:alezakharov@rambler.ru)

**Безменов Артем Игоревич** – доцент кафедры Общей технологии силикатов Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д. И. Менделеева).

**Андреев Дмитрий Вадимович** – кандидат технических наук, доцент кафедры Химической технологии керамики и огнеупоров Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева (РХТУ им. Д. И. Менделеева)

---

## НОВЕЙШАЯ ИНФОРМАЦИЯ О НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

### Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева:

**Зиятдинова М.З.** «Спектрально-люминесцентные свойства иттрий-алюмооборатных, соактивированных ионами церия и тербия» (кандидат химических наук).

Разработано радиационно-стойкое соактивированное ионами церия и тербия стекло, характеризующееся высоким коэффициентом поглощения ультрафиолетового излучения и эффективной конверсией этого излучения в зелено-желтую область спектра. Охарактеризованы спектральные свойства иттрий-алюмооборатных стекол, ативированных и соактивированных  $Ce^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$  или  $Sb^{3+}$  при возбуждении УФ излучением. Показано, что соактивированные  $Ce^{3+}$  и  $Tb^{3+}$  иттрий-алюмооборатные стекла люминисцируют под воздействием рентгеновского излучения и могут быть использованы для его обнаружения. Разработана методика варки стекол в платиновых тиглях малого объема.

**Федотов С.С.** «Влияние химического состава на формирование двулучепреломляющих нанорешеток в оксидных стеклах фемтосекундным лазерным излучением» (кандидат химических наук).

Установлены закономерности формирования нанорешеток в оксидных стеклах фемтосекундным (ФС) лазерным излучением. Выявлена роль катионов-модификаторов и стеклообразующих катионов в образовании двулучепреломляющих нанорешеток в стеклах. Получены нанорешетки в титансиликатных стеклах с содержанием  $TiO_2$  от 1 до 7,5 мол. %. Показано, что изоморфное замещение атомов кремния атомами титана не приводит к каким-либо изменениям в режиме формирования нанорешеток. Установлены интервалы значений параметров лазерного излучения – количество и энергия ФС импульсов, при которых формируются периодические нанорешетки в объеме щелочносиликатных, титаносиликатных и алюмоборосиликатных бесщелочных стекол. Полученная информация представляет интерес для применения в микрофлюидике и создании оптических фазовых элементов.

### Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова.

**Щекина А.Ю.** «Технология производства композиционных вяжущих на основе отходов флотации железистых кварцитов» (кандидат технических наук).

Установлены закономерности действия отходов флотации, содержащих изодециклосипропиламин (катионный флотореагент РА-14), при структурообразовании композиционных вяжущих, за счет замедления процессов гидратации, снижения содержания этtringита, портландита, гидросиликатов и гидроалюминатов кальция в вяжущих на основе отходов флотации по сравнению с их аналогами на основе модельной системы на начальной стадии гидратации. Разработана эффективная технология получения композиционного вяжущего на основе отходов флотации, позволяющая экономить до 30% портландцемента и получить композиты с переделом прочности превышающим прочности цементного камня. Предложены составы и технология производства эффективных сухих строительных смесей для наливных полов с узлом приготовления композиционного вяжущего.