

## Технологии трёхмерной печати в строительстве. Опыт применения и перспективные направления.

*А.Б. Чаганов<sup>1</sup>, А.В. Черепанов<sup>1</sup>, И.В. Гончарук<sup>1</sup>, С.Д. Шмаков<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup> Вятский государственный университет, Киров, Россия*

*<sup>2</sup> Российский университет транспорта, Москва, Россия*

**Аннотация:** В работе проведен анализ существующих технологий трехмерной печати в контексте применения в строительстве. Рассмотрен опыт применения 3D-печати в коммерческих проектах. Обобщены научные исследования по совершенствованию различных технологий. Выявлены перспективные для строительства технологии 3D-печати – проволоочно-дуговое и ультразвуковое аддитивное производство.

**Ключевые слова:** трехмерная печать, 3D печать, строительство, аддитивные технологии.

В последние несколько лет технологии аддитивного производства привлекли к себе внимание общественности, не в последнюю очередь благодаря появлению сегмента доступного любительского оборудования, открытому программному обеспечению и проектам самокопирующихся устройств. Однако можно сказать, что развитие данной технологии началось с регистрации 1977 году Вином Свейнсоном патента на метод и устройство для производства трехмерных фигурных продуктов [1]. Таким образом, история развития аддитивных технологий насчитывает более сорока лет. В настоящий момент аддитивные технологии представляют собой обобщенное название различных технологий, отличающихся друг от друга основными физическими принципами, способами их применения, используемыми материалами и стадийностью операций при производстве изделий. Также стоит упомянуть, что данное направление находится на стадии активного развития. Все это затрудняет выработку единой классификации технологий, которая бы учитывала все особенности каждой технологии.

При этом произошел выход 3D-печати за пределы промышленного производства с проникновением в разнообразные сферы деятельности. Например, печать рельефных рисунков на текстиле в интересах индустрии

моды [2] или пищевая печать [3]. К одному из таких направлений аддитивного производства можно отнести строительную 3D-печать.

В данной статье предпринята попытка оценки существующих аддитивных технологий на применимость для изготовления строительных конструкций. Рассмотрены технологии как уже получившие определенное распространение, так и те, которые в настоящий момент времени не используются в строительном производстве, но, по мнению авторского коллектива, имеют перспективу в этом направлении.

В настоящий момент времени наибольшее распространение получила технология 3D печати бетоном (3D concrete printing - 3DCP). Данная технология успешно развивается со второй половины 90х годов, и активно используется для коммерческих проектов [4]. График развития технологии приведен на рис.1.

Также применяется технология струйной печати связующим веществом, где в качестве основного материала может использоваться песчаный грунт, цемент или цементно-песчаная смесь. В сегменте строительной печати с данной технологией в настоящий момент выступает только фирма D-Shape [5]. Наиболее успешно эта технология применяется в сегменте изготовления малых архитектурных форм [6, 7]. Упомянутая ранее 3DCP также используется в этом сегменте рынка [8, 9].

3DCP успешно используется для изготовления общественных и жилых многоквартирных зданий [10-12], широко применяется при строительстве индивидуальных жилых зданий [13, 14], а также находит применение при возведении инженерных сооружений [15, 16]. Отдельно стоит упомянуть о возможности технологии по изготовлению отдельных фрагментов здания со сложной геометрией, что предоставляет дополнительные инструменты для целей реставрации [17, 18].

Струйная технология, в свою очередь, не нашла столь широкого

---

применения в строительстве зданий. Последние новости о развитии технологии сообщают, о строительстве фирмой D-Shape частного жилого дома, со сложными архитектурными решениями по одноименной технологии [19, 20].

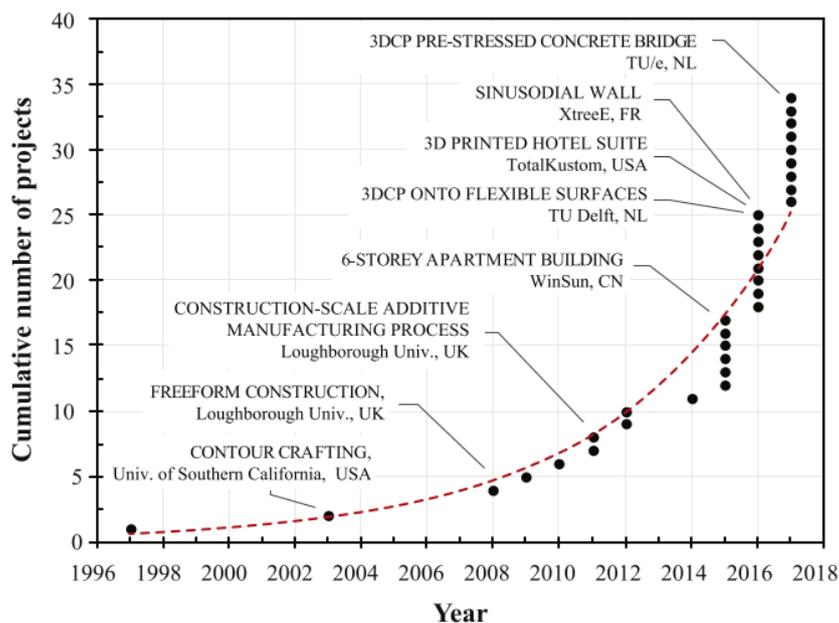


Рис.1 – Проекты с применением 3DCP [4]

При этом в ряде случаев имеет место отступление от классической технологии 3D печати. Здание при этом не изготавливается непосредственно на месте строительства, а собирается из блоков или панелей, изготовленных на 3D-принтере [12].

Обе технологии имеют ряд существенных ограничений и не решенных проблем, таких, как: сложности с изготовлением горизонтальных конструкций (балок, перемычек стен и перекрытий), сложности выполнения армирования, теплотехническая неоднородность ограждающих конструкций, нерешенные вопросы материаловедения [21]. Также у технологии 3DCP наблюдается ряд проблем, связанных со стабильностью экструдирования и укладки состава [22].

Эти и другие проблемы препятствуют полной автоматизации процесса производства строительной продукции, что, в свою очередь, влечет за собой

дополнительные затраты на вспомогательные операции, и необходимый для них персонал. Также стоит упомянуть, что целый комплекс строительных работ (отделочные, прокладка инженерных сетей, земляные работы) остается автоматизированным в крайне низкой степени. Таким образом, применение аддитивных технологий способно удешевить только стоимость некоторых несущих и ограждающих конструкций. Причем, экономический эффект будет тем меньше, чем более массовой будет застройка. Отсюда вытекает логичное применение строительных 3D-принтеров для изготовления зданий со сложной уникальной архитектурой, либо мелкосерийных изделий, что, в целом, и демонстрирует имеющийся опыт применения. Также описанные технологии выглядят привлекательно в случаях, когда доставка большого количества стройматериалов и специализированного оборудования невозможна или затруднена. Этим фактом обусловлен интерес в применении аддитивных технологий армией [23-25] и Европейским космическим агентством [26].

Ряд технологий, активно применяющихся в машиностроении, постепенно находят применение и в строительной сфере.

Первая, технология, о которой стоит упомянуть это проволоочно-дуговая наплавка (wire arc additive manufacturing - WAAM) одна из разновидностей технологии с прямым подводом энергии (direct energy deposition - DED). Данная технология с успехом применяется в различных областях машиностроения. Применение в строительстве в настоящий момент ограничивается разовыми имиджевыми проектами и экспериментальными работами.

Наиболее известна применением этой технологии для строительной отрасли нидерландская компания MX3D со своей демонстрацией технологии в виде изготовления моста через канал Аудезис Ахтербургвал в Амстердаме, представленного на рис.2 [27]. В сотрудничестве и инженерами из Takenaka

---

был разработан и изготовлен коннектор для соединения деревянных несущих конструкций (на рис.3-4) [28].



Рис.2. – Мост через канал Аудезис Ахтербургвал [27].



Рис.3. – Общий вид несущих конструкций, собранных с помощью коннекторов Takenaka [28].

Активно проводятся экспериментальные исследования по

---

изготовлению различных строительных конструкций и их частей: колонн сложного и переменного сечения [29, 30]. Также проводятся экспериментальные исследования по применению WAAM для изготовления армирования при печати бетоном [31].

Инженеры компании Аруп провели разработку и сравнительные испытания узла несущих конструкций для существующего проекта освещения, выполненного на улице Гроде Марктстраат в Гааге. Новый узел проектировался под выполнение с помощью технологии лазерного плавления в слое металлических порошков (selective laser sintering - SLS). Несущие конструкции системы освещения уникальны и основаны на принципе тенсигрити. Путем применения технологии оптимизации топологии (генеративного дизайна), пересмотра некоторых конструктивных решений и адаптации технологии изготовления, инженерам удалось добиться снижения длины конструкции узла в два раза и уменьшение веса на 70% (рис.5). Общая масса всех несущих конструкций при этом снизилась на 40%. Однако стоимость изготовления при этом все равно осталась выше [32, 33].

С применением этой же технологии был выполнен совместный исследовательский проект Университета прикладных наук в Дармштадте и компании Нематокс, специализирующейся на фасадных конструкциях, представленных на рис.6-7. В качестве объекта исследования/разработки выступили узловые коннекторы фасадных профилей для нестандартных сопряжений. Данный проект не получил дальнейшего развития и остался экспериментальным [34, 35].

В рамках этой же технологии проводятся эксперименты по применению в различных узлах соединений и усилению металлических конструкций (рис.8). За счет применения WAAM и топологической оптимизации удается достичь меньшей металлоемкости стандартных

---

решений [36].



Рис. 4. – Коннектор Takenaka [28].

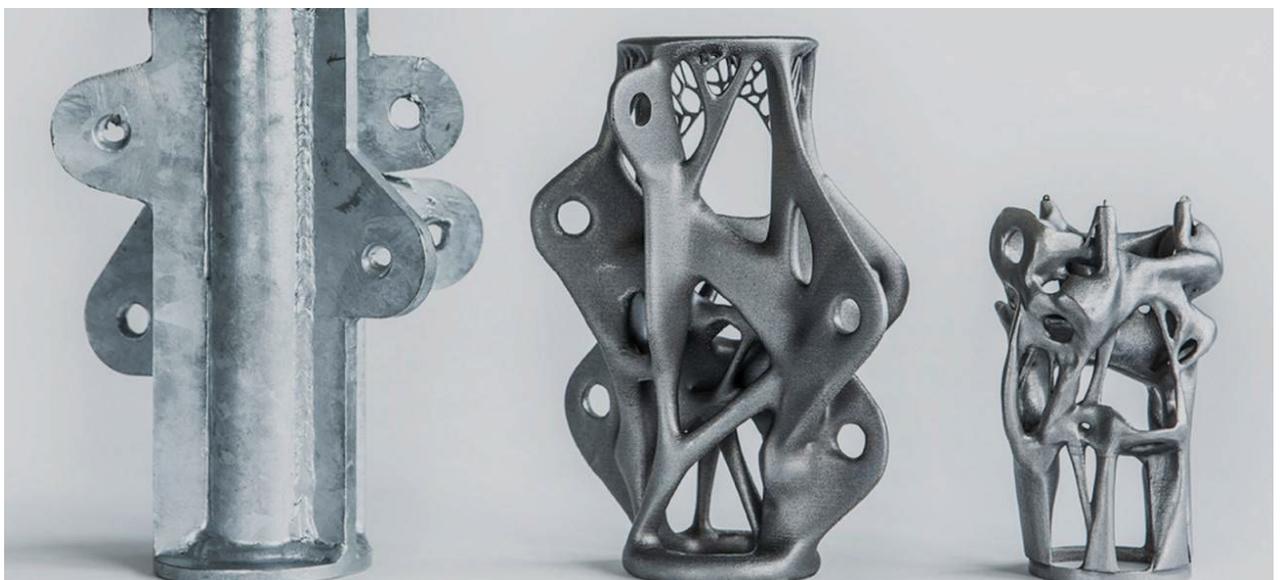


Рис.5. – Сравнение узлов соединения тросовых конструкций. Слева направо: стандартный узел крепления; первая итерация узла, спроектированного с применением топологической оптимизации и изготовленного с применением 3д печати; вторая итерация [32].

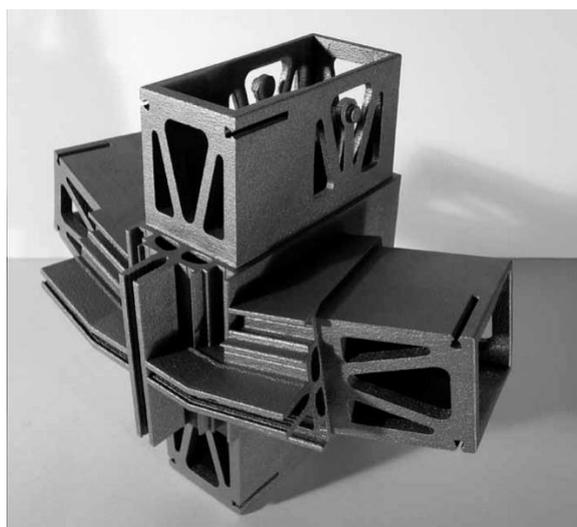


Рис.6. – Узел соединения фасадных профилей [35].



Рис.7. – Общий вид конструкции [35].

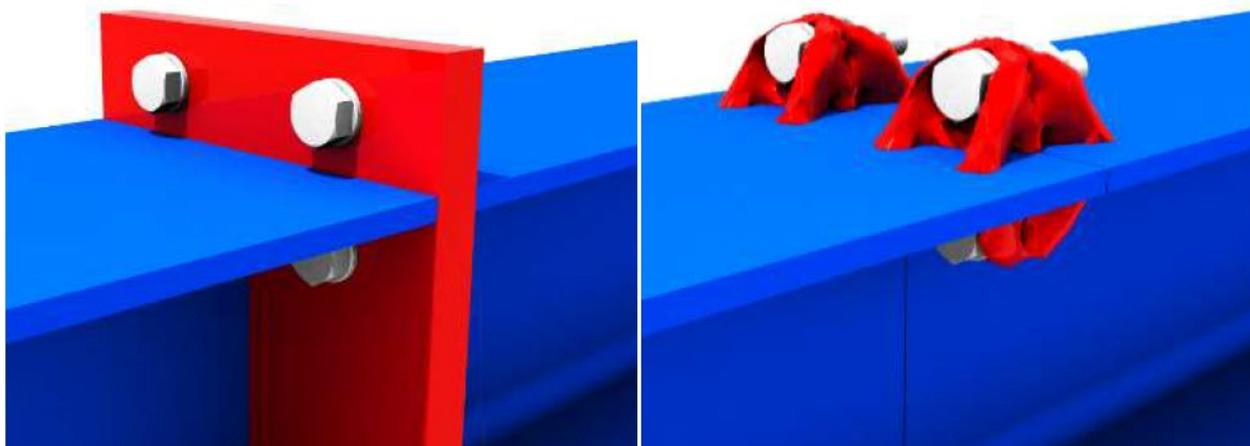


Рис.8. – Стандартный фланцевый узел соединения (слева), оптимизированный под технологию WAAM (справа) [36].

Ученые из Политехнического института Милана провели успешный эксперимент по применению в качестве материала для аддитивного производства имитатор лунного реголита [37]. В качестве технологии было выбрано селективное лазерное спекание (selective laser melting - SLM), которое позволяет добиваться соединения частиц порошка без их полного расплавления (рис.9).

Рассмотрим перспективные технологии, применение которых в строительстве в настоящий момент не рассматривается. Прежде всего,

необходимо обратить внимание на технологии, которые являются прямыми или частичными аналогами тем технологиям, которые уже применяются в производстве строительных конструкций в той или иной степени. Информация представлена в таблице 1.

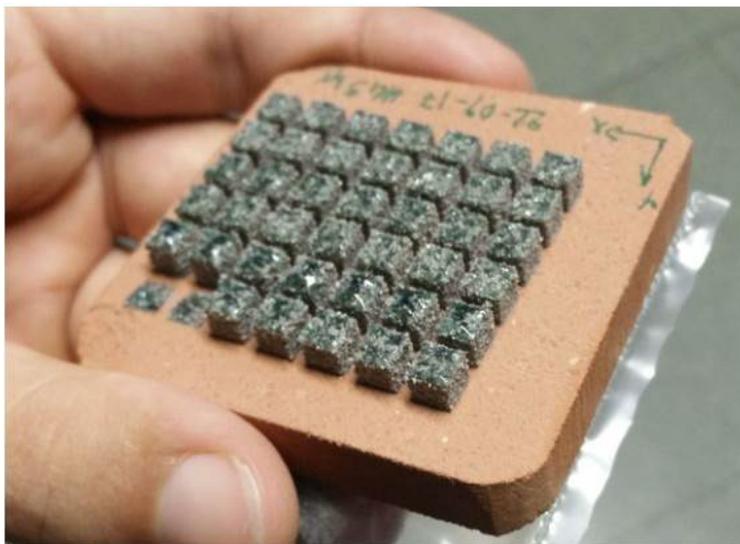


Рис.9. – Образцы, изготовленные из лунного реголита [37].

Стоит отметить, что названные в таблице технологии имеют множество разновидностей в зависимости от технологических нюансов производства. Поэтому в таблице указаны только основные их виды, как в достаточной мере отражающие суть метода производства.

Так же одним из перспективных направлений аддитивного производства, не применяемого в настоящий момент в строительстве, является ультразвуковое аддитивное производство (ultrasonic additive manufacturing - UAM). В данной технологии под воздействием ультразвуковой сварки происходит процесс соединения предварительно вырезанных тонких листов металла (фольги). Отличительной особенностью является двухэтапный процесс выполнения каждого слоя, что дает возможность контролировать целостность слоя до и после сварки.

Таблица 1

Обзор перспективных технологий

	Технология	Альтернатива	Отличия
1	WAAM	Порошковое прямое энергетическое осаждение (Powder Direct Energy Deposition)	Применение в качестве материала порошкового металла и лазера для его плавления.
		Электронно-лучевое изготовление свободной формы (Electron-beam freeform fabrication - EBF3)	Применение электронно-лучевой плавки проволоки.
		Лазерная наплавка проволокой (Laser Wire Cladding - LWC)	Применение лазера для плавления проволоки.
2	SLS	SLM	Зерна порошка подвергаются спеканию, а не полному плавлению.
		Прямое лазерное спекание металлов (direct metal laser sintering - DMLS)	Использование двухкомпонентного порошкового состава.
		Электронно-лучевая наплавка (Electron Beam Melting -EBM)	Применение электронно-лучевой плавки порошка.
3	SLM	SLS	Полная плавка порошка.
		DMLS	Использование двухкомпонентного порошкового состава.
		EBM	Применение электронно-лучевой плавки порошка.

Технология UAM обладает рядом существенных преимуществ:

- 1) При сварке не происходит значительного нагрева материала, что значительно снижает остаточные внутренние напряжения [38];
- 2) Меньшая энергоемкость вследствие отсутствия необходимости в плавлении материала [39];
- 3) Возможность послойного соединения различных сплавов или металлов, что дает возможность тонко регулировать характеристики изделия [38];
- 4) Возможность встраивания электронных компонентов внутрь, в том числе датчиков для мониторинга состояния зданий и сооружений [40, 41].

Данная технология плохо применима при соединении тугоплавких металлов [37], однако, в контексте использования в строительных конструкциях, это не существенно, поскольку для их изготовления крайне редко применяются металлы с температурой плавления выше, чем у стали.

Существенным же для строительства являются технологические ограничения на сильное изменение формы детали, которое возникает из-за давления, оказываемого на изделие вибрационными роликами для сварки [38]. Это налагает определенные ограничения на различные «ветвления деталей», как в примерах, изготовленных по технологии WAAM и SLS.

По итогу рассмотрения существующих аддитивных технологий, можно сделать следующие выводы:

- 1) Область применения аддитивных технологий в строительстве, в настоящее время, ограничивается уникальными по своим архитектурным или конструктивным характеристикам объектами. В случаях, когда аддитивное производство находит применение для массового строительства, оно используется в комбинации с традиционными методами строительства;
  - 2) Наибольшее распространение получила технология 3DCP производящая несущие конструкции из бетона или других строительных смесей с
-

применением вяжущих веществ. Технология получит ускоренное развитие после решения задачи по автоматизации армирования при ее применении;

3) Технология 3DP имеет перспективы найти применение при строительстве в регионах с плохой транспортной доступностью, т.к. основным материалом для нее может служить местное сырье (песчаные грунты);

4) По тем же соображениям может получить развитие технология SLM, однако ее применение будет оправдано в условиях крайне низкой транспортной доступности т.к. она в отличие от 3DP не требует дополнительного использования клеевого состава, но является значительно более энергоемкой.

5) Применение конструкций из металла, изготовленных аддитивными способами, пока что не выходит за рамки экспериментов и имиджевых проектов. Не в последнюю очередь из-за высокой стоимости сырья. Даже не смотря на оптимизацию конструкции, которую позволяет провести аддитивный способ производства, себестоимость по сравнению с традиционными технологиями производства остается выше. Наиболее вероятное применение для аддитивных стальных конструкций видится в изготовлении оптимизированных узлов сопряжения конструкций;

6) По совокупности характеристик, несмотря на технологические ограничения, наиболее перспективной технологией для изготовления металлических строительных конструкций представляется UAM. По итогам рассмотрения сложившейся ситуации в индустрии аддитивного производства, составлена диаграмма Венна (рис. 10), учитывающая степень развития и технологическую взаимозаменяемость.

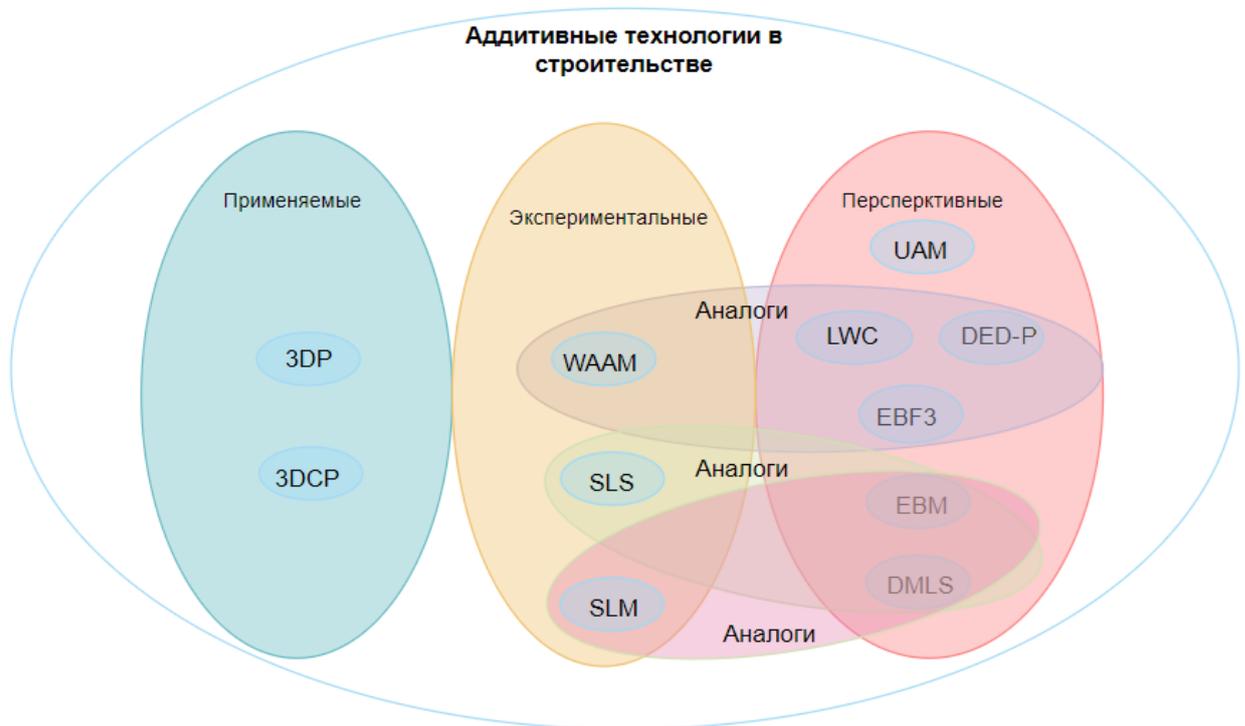


Рис 10. – Диаграмма аддитивных технологий пригодных для применения в строительстве.

### Литература

1. Swaison W.K. Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product / Патент на изобретение №US4041476A./1977. — URL: [patents.google.com/patent/US4041476A/en](https://patents.google.com/patent/US4041476A/en) (дата обращения: 16.01.2025)
2. Discover the Magic of 3DFashion™ Technology // URL: [stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/3dfashion-tech-style](https://stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/3dfashion-tech-style) (дата обращения: 08.01.2025).
3. Дерюгин С.В., Стреляная Ю.О. Технологии 3d-печати в пищевой промышленности // Современные технологии: проблемы и перспективы. — Севастополь, 2022. — С. 116-121.
4. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research // Cement and Concrete Research. — 2018. — № 112. — pp. 37-49.

5. Gardiner J.B., Burry M.C. D\_Shape-construction scale additive manufacturing; reflection on current projects and the state of technology development // 6th international conference on innovation in AEC 2009. — Melbourne, 2009. — pp. 1-11.
  6. Root Chair // URL: [d-shape.com/Prodotti/root-chair](http://d-shape.com/Prodotti/root-chair) (дата обращения: 29.11.2023).
  7. The Radiolaria Pavilion // URL: [d-shape.com/Prodotti/the-radiolaria-pavilion](http://d-shape.com/Prodotti/the-radiolaria-pavilion) (дата обращения: 08.01.2025).
  8. МАФ Малые Архитектурные Формы из 3D бетона // URL: [3d4art.com/malye-arkhitekturnye-formy/](http://3d4art.com/malye-arkhitekturnye-formy/) (дата обращения: 29.11.2023).
  9. Малые Архитектурные Формы // URL: [rvs3d.ru/malye-arkhitekturnye-formy-maf/?ysclid=m5o0635twj211065288](http://rvs3d.ru/malye-arkhitekturnye-formy-maf/?ysclid=m5o0635twj211065288) (дата обращения: 08.01.2025).
  10. Жеребцов Н.Д. Из первых уст: рассказ инженера Apis Cor о строительстве рекордного 3D-печатного здания в Дубае // URL: [3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/iz-pervykh-ust-rasskaz-inzhenera-apis-cor-o-stroitelstve-rekordnogo-3d-pechatnogo-zdaniya-v-dubae](http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/iz-pervykh-ust-rasskaz-inzhenera-apis-cor-o-stroitelstve-rekordnogo-3d-pechatnogo-zdaniya-v-dubae) (дата обращения: 08.01.2025).
  11. Heidelberg Inaugurates Europe's Largest 3D Printed Building: The Wave House Data Center // URL: [cobod.com/heidelberg-inaugurates-europes-largest-3d-printed-building-the-wave-house-data-center/](http://cobod.com/heidelberg-inaugurates-europes-largest-3d-printed-building-the-wave-house-data-center/) (дата обращения: 10.01.2025).
  12. Romance and majesty - Yingchuang invites you to immerse yourself in the 3D-printing luxury villa // URL: [winsun3d.com/En/News/news\\_inner/id/588](http://winsun3d.com/En/News/news_inner/id/588) (дата обращения: 08.01.2025).
  13. Crane WASP at IAAC, Institute for Advanced Architecture of Catalonia (Barcellona) // URL: [3dwasp.com/en/crane-wasp-at-iaac-institute-for-advanced-architecture-of-catalonia-barcellona/](http://3dwasp.com/en/crane-wasp-at-iaac-institute-for-advanced-architecture-of-catalonia-barcellona/) (дата обращения: 10.01.2025).
-

14. Residential Construction El Cosmico // URL: [iconbuild.com/projects/el-cosmico](https://iconbuild.com/projects/el-cosmico) (дата обращения: 10.01.2025).
  15. World's First 3D Printed Large Concrete Tanks Made With Materials Savings Of 25% // URL: [cobod.com/worlds-first-3d-printed-large-concrete-tanks-made-with-materials-savings-of-25/](https://cobod.com/worlds-first-3d-printed-large-concrete-tanks-made-with-materials-savings-of-25/) (дата обращения: 10.01.2025).
  16. Salet T.A.M., Ahmed Y. Z., Bos F.P., Laagland H.L.M. Design of a 3D printed concrete bridge by testing // Virtual and Physical Prototyping. — 2018. — № 3. — pp. 222-236.
  17. Moreira, E., Vieira, R., Xavier, M., Cardoso, D., Nogueira, J. Documentation and digital fabrication methods for restoration of eclectic metal ornaments // Automation, Sustainability, Digital Fabrication - Selected extended Papers of the 7th Brazilian-German Conference. — Campinas, 2017. — pp. 186-198.
  18. 3D printing takes on the restoration of a historic building // URL: [3dnatives.com/en/edg-architecture-3d-printing110620184/](https://3dnatives.com/en/edg-architecture-3d-printing110620184/) (дата обращения: 10.01.2025).
  19. Organic Villa // — URL: [d-shape.com/Prodotti/organic-villa](https://d-shape.com/Prodotti/organic-villa) (дата обращения: 08.01.2025).
  20. Mings J How Big Is the Biggest Freeform 3D Architecture Print? This Big // — URL: [solidsmack.com/fabrication/enrico-dini-big-freeform-architecture-3d-print-sardinia-villa-rosce/](https://solidsmack.com/fabrication/enrico-dini-big-freeform-architecture-3d-print-sardinia-villa-rosce/) (дата обращения: 08.01.2025).
  21. Пустогвар, А.П., Адамцевич, А.О., Волков, А.А. Технология и организация аддитивного строительства // Промышленное и гражданское строительство. — 2018. — № 9. — С. 12-20.
  22. Overmeir A.L., Figueiredo S.C., Savija B., Bos F.P., Schlangen E. Design and analyses of printable strain hardening cementitious composites with optimized particle size distribution // Construction and Building materials. — 2022. — № 324. — pp. 1-15.
-

23. Климанов С.Г., Громов В.Н. Системный подход к проблеме проектирования и строительства быстровозводимых сооружений для обустройства войск в районах Арктики // Актуальные проблемы военно-научных исследований. — 2021. — № 13. — С. 319-335.
  24. Бирюков Ю.А., Демьянов А.А., Кардаш Д.Е. Современное состояние аддитивных технологий и перспективы их развития для строительства объектов военной инфраструктуры // Вопросы оборонной техники. серия 16: технические средства противодействия терроризму. — 2022. — № 9-10. — С. 157-169.
  25. Руденко, А. Е., Кардаш, Д. Е. Опыт строительства аддитивным методом войсковых объектов армии США // Научные проблемы материально-технического обеспечения вооружённых сил российской федерации. — 2020. — № 3. — С. 140-146.
  26. Edwards L 3D printer could build moon bases // — URL: [phys.org/news/2010-04-3d-printer-moon-bases.html](https://phys.org/news/2010-04-3d-printer-moon-bases.html) (дата обращения: 08.01.2025).
  27. MX3D Bridge // — URL: [mx3d.com/industries/mx3d-bridge/](https://mx3d.com/industries/mx3d-bridge/) (дата обращения: 08.01.2025).
  28. Myers L MX3D + takenaka utilize robotic 3D printing to build a structural steel connector // — URL: [designboom.com/architecture/mx3d-takenaka-3d-print-structural-steel-connector-12-12-2019/](https://designboom.com/architecture/mx3d-takenaka-3d-print-structural-steel-connector-12-12-2019/) (дата обращения: 09.01.2025).
  29. Waldschmitt B., Borg Costanzi C., Knaack U., Lange J. 3d printing of column structures for architectural applications // Architecture, Structures and Construction. — 2022. — № 2. — pp. 565-574.
  30. Zhang R., Gardner L., Meng X., Buchanan C., Matilainen V-P., Piili H., Salminen A., Optimisation and compressive testing of additively manufactured stainless steel corrugated shells // EUROSTEEL 2021 - 9th
-

- European Conference on Steel and Composite. — Sheffield's/papers, 2021. — pp. 1829-1836.
31. Mechtcherine V., Buswell R., Kloft H., Freek P.B., Hack N., Wolfs R., Sanjayan J., Nematollahi B., Ivaniuk E., Neef T. Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework // Cement and Concrete Composites. — 2021. — № 119. — pp. 1-17.
32. Galjaard S., Hofman S., Perry N., Ren Sh. Optimizing Structural Building Elements in Metal by using Additive Manufacturing // IASS Future Visions 2015. — Amsterdam, 2015. — pp. 1-13.
33. Galjaard S., Hofman S., Ren Sh. New Opportunities to Optimize Structural Designs in Metal by Using Additive Manufacturing // Advances in Architectural Geometry 2014. — London:, 2014. — pp. 79-93.
34. Strauss H., Knaack U. Additive Manufacturing for Future Facades: The potential of 3D printed parts for the building envelope // Journal of Facade Design and Engineering. — 2016. — № 3. — pp. 225-235.
35. Strauss H AM Envelope. The potential of Additive Manufacturing for façade construction// — Delft: Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Architectural Engineering + Technology department, 2013 — 276 p.
36. Feucht T., Lange J. 3-D-Printing with Steel: Additive Manufacturing of Connection Elements and Beam Reinforcements // IABSE Symposium: Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management. — Guimaraes, 2019. — pp. 1836-1841.
37. Sitta L.A., Lavagna M. 3D Printing of Moon highlands regolith simulant // 69th International Astronautical Congress (IAC). — Bremen, 2018. — C. 1-7.
38. Zhang C., Yu H., Sun D., Liu W. Ultrasonic Additive Manufacturing of Metallic Materials // Metals. — 2022. — № 12. — pp. 1-3.
-

39. Ishfaq K., Abas Z., Saravana K.M., Arif M.M. Review of recent trends in ultrasonic additive manufacturing: current challenges and future prospects // Rapid Prototyping Journal. — 2023. — № 6. — pp. 1195-1211.
40. Chilelli S.K., Schomer J.J., Dapino M.J. Detection of Crack Initiation and Growth Using Fiber Bragg Grating Sensors Embedded into Metal Structures through Ultrasonic Additive Manufacturing // Sensors. — 2019. — № 19. — pp. 1-18.
41. Li J., Monaghan, Nguen T.T., Kay R.W., Friel R.J., Harris R.A. Harris, Multifunctional metal matrix composites with embedded printed electrical materials // Composites Part B: Engineering. — 2017. — № 113. — pp. 342-354.

### References

1. Swaison W.K. Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product. Patent na izobretenie №US4041476A./1977. URL: [patents.google.com/patent/US4041476A/en](https://patents.google.com/patent/US4041476A/en) (date accessed: 16.01.2025)
  2. Discover the Magic of 3DFashion™ Technology. URL: [stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/3dfashion-tech-style](https://stratasys.com/en/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/3dfashion-tech-style) (date accessed: 08.01.2025).
  3. Deryugin S.V., Strelyanaya Yu.O. Sovremennyy'e texnologii: problemy` i perspektivy`. Sevastopol`, 2022. pp. 116-121.
  4. Buswell R.A., Leal de Silva W.R., Jones S.Z., Dirrenberger J. Cement and Concrete Research. 2018. № 112. pp. 37-49.
  5. Gardiner J.B., Burry M.C. 6th international conference on innovation in AEC 2009. Melbourne, 2009. pp. 1-11.
  6. Root Chair. URL: [d-shape.com/Prodotti/root-chair](https://d-shape.com/Prodotti/root-chair) (date accessed: 29.11.2023).
-

7. The Radiolaria Pavilion. URL: [d-shape.com/Prodotti/the-radiolaria-pavilion](https://d-shape.com/Prodotti/the-radiolaria-pavilion) (date accessed: 08.01.2025).
  8. MAF Maly'e Arxitekturny'e Formy` iz 3D betona [SAF Small Architectural Forms made of 3D concrete]. URL: [3d4art.com/malye-arkhitekturnye-formy/](https://3d4art.com/malye-arkhitekturnye-formy/) (date accessed: 29.11.2023).
  9. Maly'e Arxitekturny'e Formy`. URL: [rvs3d.ru/malye-arhitekturnye-formy-maf/?ysclid=m5o0635twj211065288](https://rvs3d.ru/malye-arhitekturnye-formy-maf/?ysclid=m5o0635twj211065288) (date accessed: 08.01.2025).
  10. Zherebczov N.D. Iz pervy`x ust: rasskaz inzhenera Apis Cor o stroitel`stve rekordnogo 3D-pechatnogo zdaniya v Dubae [Zherebtsov N.D. First-hand accounts: Apis Cor engineer's story about the construction of a record-breaking 3D-printed building in Dubai]. URL: [3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/iz-pervykh-ust-rasskaz-inzhenera-apis-cor-o-stroitelstve-rekordnogo-3d-pechatnogo-zdaniya-v-dubae](https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/iz-pervykh-ust-rasskaz-inzhenera-apis-cor-o-stroitelstve-rekordnogo-3d-pechatnogo-zdaniya-v-dubae) (date accessed: 08.01.2025).
  11. Heidelberg Inaugurates Europe's Largest 3D-Printed Building: The Wave House Data Center. URL: [cobod.com/heidelberg-inaugurates-europes-largest-3d-printed-building-the-wave-house-data-center/](https://cobod.com/heidelberg-inaugurates-europes-largest-3d-printed-building-the-wave-house-data-center/) (date accessed: 10.01.2025).
  12. Romance and majesty - Yingchuang invites you to immerse yourself in the 3D printing luxury villa. URL: [winsun3d.com/En/News/news\\_inner/id/588](https://winsun3d.com/En/News/news_inner/id/588) (date accessed: 08.01.2025).
  13. Crane WASP at IAAC, Institute for Advanced Architecture of Catalonia (Barcellona). URL: [3dwasp.com/en/crane-wasp-at-iaac-institute-for-advanced-architecture-of-catalonia-barcellona/](https://3dwasp.com/en/crane-wasp-at-iaac-institute-for-advanced-architecture-of-catalonia-barcellona/) (date accessed: 10.01.2025).
  14. Residential Construction El Cosmico. URL: [iconbuild.com/projects/el-cosmico](https://iconbuild.com/projects/el-cosmico) (date accessed: 10.01.2025).
-

15. World's First 3D Printed Large Concrete Tanks Made With Materials Savings Of 25%. URL: [cobod.com/worlds-first-3d-printed-large-concrete-tanks-made-with-materials-savings-of-25/](https://cobod.com/worlds-first-3d-printed-large-concrete-tanks-made-with-materials-savings-of-25/) (date accessed: 10.01.2025).
16. Salet T.A.M., Ahmed Y. Z., Bos F.P., Laagland H.L.M. Virtual and Physical Prototyping. 2018. № 3. pp. 222-236.
17. Moreira, E., Vieira, R., Xavier, M., Cardoso, D., Nogueira, J. Automation, Sustainability, Digital Fabrication - Selected extended Papers of the 7th Brazilian-German Conference. Campinas, 2017. pp. 186-198.
18. 3D printing takes on the restoration of a historic building. URL: [3dnatives.com/en/edg-architecture-3d-printing110620184/](https://3dnatives.com/en/edg-architecture-3d-printing110620184/) (date accessed: 10.01.2025).
19. Organic Villa. URL: [d-shape.com/Prodotti/organic-villa](https://d-shape.com/Prodotti/organic-villa) (date accessed: 08.01.2025).
20. Mings J. URL: [solidsmack.com/fabrication/enrico-dini-big-freeform-architecture-3d-print-sardinia-villa-rocce/](https://solidsmack.com/fabrication/enrico-dini-big-freeform-architecture-3d-print-sardinia-villa-rocce/) (date accessed: 08.01.2025).
21. Pustogvar, A.P., Adamceвич, A.O., Volkov, A.A. Promy'shlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2018. № 9. pp. 12-20.
22. Overmeir A.L., Figueiredo S.C., Savija B., Bos F.P., Schlangen E. Construction and Building materials. 2022. № 324. pp. 1-15.
23. Klimanov S.G., Gromov V.N. Aktual'ny'e problemy` voenno-nauchny`x issledovanij. 2021. № 13. pp. 319-335.
24. Biryukov Yu.A., Dem`yanov A.A., Kardash D.E. Voprosy` oboronnoj texniki. seriya 16: texnicheskie sredstva protivodejstviya terrorizmu. 2022. № 9-10. pp. 157-169.
25. Rudenko, A. E., Kardash, D. E. Nauchny`e problemy` material`no-texnicheskogo obespecheniya vooruzhyonny`x sil rossijskoj federacii. 2020. № 3. pp. 140-146.

26. Edwards L 3D printer could build moon bases. URL: [phys.org/news/2010-04-3d-printer-moon-bases.html](https://phys.org/news/2010-04-3d-printer-moon-bases.html) (date accessed: 08.01.2025).
  27. MX3D Bridge. URL: [mx3d.com/industries/mx3d-bridge/](https://mx3d.com/industries/mx3d-bridge/) (circulation date: 08.01.2025).
  28. Myers L MX3D + takenaka utilize robotic 3D printing to build a structural steel connector. URL: [designboom.com/architecture/mx3d-takenaka-3d-print-structural-steel-connector-12-12-2019/](https://designboom.com/architecture/mx3d-takenaka-3d-print-structural-steel-connector-12-12-2019/) (date accessed: 09.01.2025).
  29. Waldschmitt B., Borg Costanzi C., Knaack U., Lange J. Architecture, Structures and Construction. 2022. № 2. pp. 565-574.
  30. Zhang R., Gardner L., Meng X., Buchanan C., Matilainen V-P., Piili H., Salminen A. Eurosteel 2021 - 9th European Conference on Steel and Composite. — Sheffield:ce/papers, 2021. pp. 1829-1836.
  31. Mechtcherine V., Buswell R., Kloft H., Freek P.B., Hack N., Wolfs R., Sanjayan J., Nematollahi B., Ivaniuk E., Neef T. Cement and Concrete Composites. 2021. № 119. pp. 1-17.
  32. Galjaard S., Hofman S., Perry N., Ren Sh. IASS Future Visions 2015. Amsterdam, 2015. pp. 1-13.
  33. Galjaard S., Hofman S., Ren Sh. Advances in Architectural Geometry 2014. London, 2014. pp. 79-93.
  34. Strauss H., Knaack U. Journal of Facade Design and Engineering. 2016. № 3. pp. 225-235.
  35. Strauss H AM Envelope. Delft: Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Architectural Engineering + Technology department, 2013. 276 p.
  36. Feucht T., Lange J. IABSE Symposium: Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management. Guimaraes, 2019. pp. 1836-1841.
-



37. Sitta L.A., Lavagna M. 69th International Astronautical Congress (IAC). Bremen, 2018. pp. 1-7.
38. Zhang C., Yu H., Sun D., Liu W. Metals. 2022. № 12. pp. 1-3.
39. Ishfaq K., Abas Z., Saravana K.M., Arif M.M. Rapid Prototyping Journal. 2023. № 6. pp. 1195-1211.
40. Chillelli S.K., Schomer J.J., Dapino M.J. Sensors. 2019. № 19. pp. 1-18.
41. Li J., Monaghan, Nguen T.T., Kay R.W., Friel R.J., Harris R.A. Composites Part B: Engineering. 2017. № 113. pp. 342-354.

**Дата поступления: 3.11.2024**

**Дата публикации: 26.01.2025**