

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2021, №2, Том 13 / 2021, No 2, Vol 13 <https://esj.today/issue-2-2021.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/26SAVN221.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Неустроев Д.В., Овчинников И.Г. Аддитивные технологии и их применение в промышленном и транспортном строительстве // Вестник Евразийской науки, 2021 №2, <https://esj.today/PDF/26SAVN221.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

For citation:

Neustroev D.V., Ovchinnikov I.G. (2021). Additive technologies and their application in industrial and transport construction. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 2(13). Available at: <https://esj.today/PDF/26SAVN221.pdf> (in Russian)

Неустроев Данил Владимирович

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
Магистрант
E-mail: Neustroev7289@gmail.com

Овчинников Игорь Георгиевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, Россия
ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия
Профессор
Доктор технических наук
E-mail: bridgesar@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922

Researcher ID: <https://www.researcherid.com/rid/J-5539-2013>

Аддитивные технологии и их применение в промышленном и транспортном строительстве

Аннотация. В нашем мире требования к различным производствам растут. Основные показатели производства: эффективность, экономичность, повышение качества. Для достижения таких показателей требуется сокращать расходы, рационально использовать материал и уменьшать количество ручного труда при производстве. Пуль к таким результатам – оптимизация старых технологий и внедрение новых. Одной из новых технологий, позволяющих повышать показатели при производстве, является аддитивная технология.

В данной статье рассматривается проблема применения перспективной технологии – аддитивной печати при возведении не только промышленных и гражданских зданий, но и транспортных сооружений. Для обозначения проблемы в статье кратко описываются существующие технологии, используемые при 3D-печати, виды 3D-печати в мире и в строительстве, рассмотрены примеры использования данной технологии в гражданском строительстве в России и за рубежом. Помимо этого, рассматривается применение данных технологий в сферах, отличных от строительства. Проведен анализ применяющихся технологий в дорожном строительстве. Проводится сравнение этих технологий с аддитивными технологиями, и приводится доказательство, что послойные технологии в дорожном строительстве используется очень давно, раньше, чем в остальных сферах. Для доказательства этого сравнивается оборудование, используемое при устройстве дорожного полотна и при использовании 3D-печати. Также обозревается существующий опыт применения 3D-печати при создании мостовых сооружений в разных странах, с подробным анализом применяющихся при печати технологий. Процесс печати проанализирован с экономической точки зрения.

Рассматривается особый способ применения 3D-печати при проектировании мостовых сооружений – макетирование. С помощью аддитивных технологий можно создавать макеты сооружений с малым количеством трудовых и временных затрат. Такие макеты можно использовать при испытаниях и визуализации. Примеры использования макетов приведены и проанализированы.

Ключевые слова: транспортное строительство; 3D-печать; аддитивное производство; современные технологии; оптимизация строительства; мостовые сооружения; гражданское строительство; асфальтоукладчик

Введение

Во многих отраслях промышленности активно внедряются различные новые технологии, позволяющие повысить эффективность производства, увеличить производимый объем, снизить издержки, снизить количество отходов. В строительстве, в частности в транспортном, обновление и приход новых технологий происходит достаточно редко. При этом, внедрив новые технологии, можно добиться преимуществ, указанных выше. Одна из таких технологий – аддитивное производство.

Аддитивное производство является способом создания любых трехмерных объектов с простой и сложной геометрией на основе цифровой модели. Технологии 3D-печати отлично себя зарекомендовали и прочно укоренились в различных отраслях и сферах жизни общества. Возможности, которые предоставляет данная технология, можно считать практически безграничными.

Чарльз Халл – прародитель данной технологии, родом из Америки. Родилась такая идея следующим образом: Чарльз работал в компании Ultraviolet Products (UVP), и ему приходилось неделями отливать маленькие пластиковые детали, чтобы потом собрать их в цельное изделие-прототип. Такой способ отнимал достаточно много времени и был весьма трудозатратным. Но такие детали были нужны для испытания пригодности новых продуктов.

В компании UVP повсюду было ультрафиолетовое излучение, и именно оно подтолкнуло Чарльза Халла закреплять отдельные тонкие слои пластика в единую деталь. Так, изобретатель наложил друг на друга тысячи тонких слоев и понял, что таким способом возможно создавать трехмерные изделия любой формы.

Запатентована идея была в 1983 году, права были переданы изобретателю, но из-за неустойчивости финансового положения компании на рынке, UVP не смогла вкладывать средства в развитие данного метода. Тогда Халл открыл собственную компанию – 3D Systems, которая сразу начала успешно развиваться, и существует по сей день, оставаясь одним из лидеров среди производителей оборудования для аддитивного производства. Среди их оборудования – программные комплексы, материалы для печати различными способами и сами принтеры.

На счету изобретателя более 200 патентных заявок по всему миру и, хотя ему уже 74 года, он и не думает останавливаться. «Моя работа слишком интересная и захватывающая, чтобы уходить на пенсию», – говорит исполнительный вице-президент и технический директор 3D Systems¹.

¹ Изобретатель технологии 3D-печати Чарльз Халл номинирован на премию European Inventor Award [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dtoday.ru/industry/izobretatel-tekhnologii-3d-pechati-charlz-khall-nominirovann-na-premiyu-european-inventor-award.html>. – Дата обращения: 22.03.2021.

Разновидность технологий 3D-печати

Отрасль аддитивных технологий прогрессивно развивается. Существует несколько различных способов создания 3D-объектов.

1. *FDM (Fused deposition modeling) – метод послойного наплавления*².

Экструдер – печатающая головка, выдавливающая материал. В данной технологии экструдер выдавливает расплавленный пластик в двумерной плоскости. После нанесения слоя экструдер поднимается и наносится второй слой, который спекается с первым. Так, из тонкой нити пластика создается трехмерная фигура.

Материалы: ABS- и PLA-пластики.

Применение: простейшие изделия из пластика.

2. *CJP (ColorJet printing) – склеивание порошкообразного материала*³.

Из порошкообразного материалы – гипса, который может быть окрашен в разные цвета, получаются послойно склеенные изделия. Порошок раскатывается по рабочей поверхности специальным роликом. Затем на данный слой наносится клеящий состав с помощью аналога печатающей головки. Состав может быть окрашен в разные цвета, а модель, созданная таким способом, разноцветная.

Материал: гипс.

3. *SLS (Selective Laser Sintering) – селективное лазерное спекание*⁴.

Технология, похожая на предыдущую по способу нанесения материала, но затвердевание материала происходит по-другому: с помощью лазеров высокой мощности происходит спекание материала, разравненного специальным ракелем по рабочей поверхности. После этого лазерный луч с помощью импульсного излучения заштриховывает соответствующий контур детали. Под воздействием высокоэнергетического лазерного луча шаровидные гранулы порошкового пластика спекаются между собой, образуя цельную деталь.

Материалы: порошковые пластики, керамика.

Применение: печать прототипов, создание изделий сложной геометрии, легковесных конструкций.

4. *MJM (MultiJet Modeling) – многоструйное моделирование*⁵.

Технология многоструйного моделирования подразумевает использование жидкого фотополимера, который наносится на рабочую платформу печатающей головкой через большое количество форсунок и послойно отверждается ультрафиолетовым проектором.

Материалы: фотополимерные пластики, воск.

² FDM технология. Как это работает [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dtool.ru/stati/fdm-tehnologiya-kak-eto-rabotaet>. – Дата обращения: 22.03.2021.

³ CJP (Color Jet Printing) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://printform.com/services/cjp>. – Дата обращения: 22.03.2021.

⁴ Introduction to SLS 3D printing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing/>. – Дата обращения: 22.03.2021.

⁵ All About Multi Jet Modeling (MJM) 3D Printing [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/all-about-multi-jet-modeling-mjm-3d-printing/>. – Дата обращения: 22.03.2021.

Применение: печать высококачественных изделий, печать моделей для последующего литья по выплавляемым и выжигаемым моделям.

5. *SLA (Laser Stereolithography) – стереолитография* [1].

В ванночку наливается фотополимер, застывающий от ультрафиолетового излучения и туда опускается стол, к которому прикрепится первый слой. На дне ванны располагается дисплей, который засвечивает определенную область. После засветки слой полимеризуется на вышележащем, а рабочая поверхность поднимается и происходит засветка следующего слоя.

Материалы: фотополимерные пластики.

Применение: печать высококачественных изделий, печать моделей для литья по выжигаемым и выплавляемым моделям.

6. *Selective Laser Melting (SLM) – селективное лазерное плавление* [2].

В данной технологии слои мелкозернистого металлического порошка под воздействием сверхмощного лазера сплавляются (спекаются) в среде инертного газа в цельнометаллические изделия. Металлический порошок разравнивается ракелем по рабочему пространству, затем контур детали заштриховывается импульсным лазером высокой мощности. Сферические гранулы металлического порошка сплавляются в цельнометаллическое изделие.

Материалы: алюминий, титан, конструкционная сталь, нержавеющая сталь, никель, сплав кобальт-хром. Поддержкой выступает не сплавленный металлический порошок, но зачастую рекомендуется дополнительно моделировать поддержки для организации теплоотвода с целью снижения температурных деформаций детали⁶.

Применение: изделия сложной геометрии, изготовление форм для литья пластиков.

В строительстве применяются способы, использующиеся в других отраслях, но материалы, используемые при возведении сооружений, не подходят на материалы для создания форм и деталей.

По классификации ASTM в версии 2012 г. аддитивные технологии подразделяются на 7 категорий, среди которых есть и применимые в строительной сфере:

- Material Extrusion – «выдавливание материала».
- Material Jetting – «разбрызгивание материала», «струйные технологии».
- Binder Jetting – «разбрызгивание связующего».
- Sheet Lamination – «соединение листовых материалов».
- Vat Photopolymerization – «фотополимеризация в ванне».
- Powder Bed Fusion – «расплавление материала в заранее сформированном слое».
- Directed energy deposition – «прямой подвод энергии непосредственно в место построения».

К категории Material extrusion относится технология MJS, в которой на принтерах есть перемещающийся подогреваемый до необходимой температуры экструдер, через который проходит смесь связующего пластификатора и металлического порошка, образуя пастообразный материал. Эта паста с помощью экструдера поступает в нужную область и образуется объемная грин-модель («green» – в значении «сырая»). Её и помещают в печь для

⁶ Аддитивные технологии 3D-печати в наукоемких отраслях промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dipaul.ru/pressroom/tretya-promyshlennaya-revoljutsiya/>. – Дата обращения: 24.03.2021.

спекания [3], так же как это делается в традиционных MIM-технологиях (Metal Injection Molding).

Способ изготовления изделий Material Jetting может быть описан технологией Polyjet, в которой материал для изготовления моделей – воск или полимер, с помощью многоструйной печатающей головки подается в зону построения. В технической литературе эту технологию иногда называют как Multi Jetting Material.

К категории Binder Jetting относятся струйные технологии или Ink-Jet технологии, в которых в отличие от технологии Material jetting в зону построения впрыскивается не модельный материал, а связующий реагент (например, технология ExOne)⁷.

Технология Sheet Lamination сочетает в себе аддитивную и «вычитающую» технологию. При использовании данной технологии материал – листы бумаги, полимерная пленка, металлическая фольга, свариваются с помощью ультразвука и оставшийся, лишний материал, впоследствии удаляется фрезерованием (рис. 1). Примером может быть технология UAM (Ultrasonic additive manufacturing, Fabrisonic).

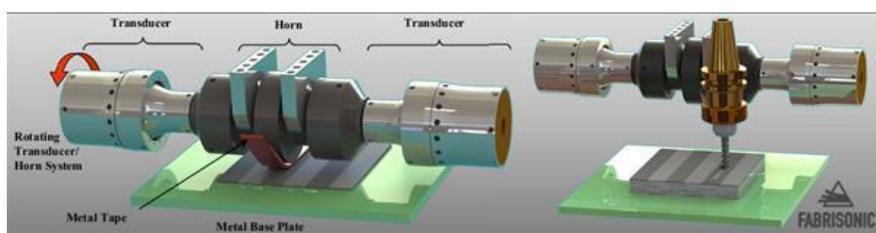


Рисунок 1. UAM-технология. Источник www.fabrisonic.com

Далее, SLA технологии от компании 3D Systems, рассмотренные ранее, соответствуют категории Vat Photopolymerization. Сюда также относятся другие технологии с жидким фотополимером, DLP-технология (Digital Light Procession, Envisiontec).

В категорию Powder Bed Fusion входит группа SLS-технологий, в которых в качестве источника тепла применяется лазер. Это такие технологии, как Arcam технология, использующая электронный луч, и технология SHS (Selective Heat Sintering (Blueprinter)), в которой источником тепла являются ТЭНы.

К категории Directed energy deposition относятся технологии, в которых и материал для образования конечной формы, и энергия для преобразования его в эту форму подводятся одновременно к каждой точке в изделии. Подвод материала в машинах, используемых в данной технологии, производится выдавливанием, а энергия чаще всего выдается в виде сфокусированного лазерного излучения (Optomec, POM) или электронного луча (Sciaky). В ряде случаев рабочий орган – головку устанавливают на роботизированной «руке» [4].

Отрасли применения аддитивных технологий

В то время, когда Чарльз Халл создал свою компанию 3D-Systems и только стремился развивать аддитивные технологии, его первыми клиентами стали два крупнейших машиностроительных завода – General Motors и Mercedes-Benz. В отрасли машиностроения 3D-печать решает множество разносторонних задач и проблем. Аддитивные технологии позволяют создавать предварительные модели тех или иных деталей, осуществлять их тестирование по тем или иным характеристикам, проводить дефектовку еще до начала производства. 3D-печать

⁷ Классификация и терминология аддитивных технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://extxe.com/9643/klassifikacija-i-terminologija-additivnyh-tehnologij/>. – Дата обращения: 24.03.2021.

снижает роль «человеческого фактора», что сказывается на большей точности и лучшем качестве изделия. В добавок ко всему, инновационные технологии данного типа помогают снизить себестоимость продукции.

Все вышеперечисленные преимущества аддитивных технологий реализуются не только в сфере машиностроения, но и в таких отраслях как медицина, фармакология, авиация, и, конечно же, строительство.

В медицине 3D-печать активно и широко применяется в стоматологии от изготовления ортопедических конструкций до хирургических лицевых имплантов. Также с помощью аддитивных технологий изготавливают различные инструменты, например скальпели, щипцы, зажимы. Это способствует повышению качества оперативной работы медицинских работников.

Опыт применения аддитивных технологий в гражданском строительстве

Аддитивные технологии активно применяются для печати малых объектов, но архитекторы и инженеры ищут различные способы применения данных технологий в строительстве. В строительной отрасли 3D-печать может быть очень полезна для возведения сложных и уникальных объектов, создания макетов для анализа прочности возводимых конструкций. Кроме этого, есть еще более интересные преимущества использования аддитивных технологий в строительстве [5]. Рассмотрим их ниже:

- Процесс строительства по цифровой модели более быстрый и точный.
- Благодаря 3D печати происходит минимизация трудовых затрат, так как принтер сам выполняет большинство процессов.
- Активно проявляется бережливое производство в снижении количества отходов материалов.
- Автоматизация процессов создает более безопасные условия для труда рабочих.
- Для производства строительных материалов, применяемых при 3D-печати, могут использоваться экологически чистые переработанные материалы.

Несмотря на множество преимуществ применения 3D-печати в строительных процессах, существуют и недостатки.

- Сокращение рабочих мест по причине того, что 3D принтер заменяет большинство ручных процессов.
- Принтер не может создавать композитные материалы, а значит не может заменить производственное предприятие.
- Большие риски, проявляющиеся в том, что небольшая ошибка в цифровой модели может привести к большим неприятностям при создании всего объекта строительства.
- Малые предприятия не могут позволить себе применение аддитивных технологий, это делает их не конкурентоспособными на строительном рынке.

Существует три основных метода 3D-печати, используемых при строительстве (рис. 2).



Рисунок 2. Основные методы 3D-печати, используемые в строительстве (источник: [6])

На настоящий момент в мире имеется достаточно большое количество примеров использования аддитивных технологий в строительстве, как в России, так и за рубежом. Установлено, что лидирующие позиции в мире по количеству построенных домов с помощью строительного 3D-принтера, занимает Китай [7]. Примером данного факта может служить особняк, построенный за полтора месяца, площадь которого составляет более 4 тысяч квадратных метров. К тому же этот дом выдерживает восьмибалльное землетрясение. Создала этот дом китайская компания Hua Shang Tengda (рис. 3)⁸.



Рисунок 3. Главный фасад напечатанного в Китае особняка (источник: [3])

Лучше всего послойную печать использовать для производства средних и малых партий изделий, так как при большем количестве экономически целесообразнее использовать традиционные способы изготовления изделий. Но технологии совершенствуются, и массовое аддитивное производство может стать дешевле. К тому же такие эксперименты уже были: китайская компания Win Sun Decoration Design Engineering использует их в строительстве. Во время первого эксперимента создавались индивидуальные жилые дома – 10 небольших домиков были созданы всего за один день⁹.

⁸ Научный доклад об основных результатах подготовленной научно-квалификационной работы (диссертации) «Обоснование метода комплексной оценки качества изделий аддитивных технологий на этапе проектирования и производства» И.В. Бугаев, И.А. Бригаднов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/147466186-Aspirant-i-v-bugaev-nauchnyy-rukovoditel-d-f-m-n-prof-kaf-informatiki.html>. – Дата обращения: 26.03.2021.

⁹ В США началась продажа первых напечатанных домов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hightech.plus/2021/02/26/v-ssha-nachalas-prodazha-pervih-napechatannih-domov>. – Дата обращения: 26.03.2021.

Несмотря на то, что в Китае отрасль послойной печати, возможно, опережает остальной мир, остальные страны предпринимают все, чтобы не уступать. Так, аддитивное производство гражданских зданий активно набирает обороты в США, Канаде, Европе [6; 8].

Примеры применения аддитивных технологий в гражданском строительстве в России

В нашей стране сфера аддитивного производства не отстает от западной и китайской. В Оренбургском государственном университете, совместно с инженерно-строительным институтом Сибирского федерального университета были введены направления подготовки магистров «Аддитивные технологии в строительстве» и «Аддитивные технологии в машиностроении». В обучении используется комплексный подход, а учебный процесс осуществляется в том числе на общей лабораторной базе архитектурно-строительного факультета и аэрокосмического института ОГУ. Все это позволит подготавливать выпускников, которые на практике владеют необходимыми знаниями в области послойной печати для производства строительных конструкций, а также транспортных сооружений.

В настоящее время в нашей стране развита печать малых архитектурных объектов – лавок, скамеек, или частей для блочного строительства (рис. 4)⁷. Так, например, производитель 3D-принтеров – фирма «СпецАвиа» – в деревне Ярославской области по заказу жителей при помощи строительного 3D-принтера создала купол для часовни.



Рисунок 4. Малые архитектурные формы компании «СпецАвиа»

(источник: <https://extxe.com/9643/klassifikacija-i-terminologija-additivnyh-tehnologij/>)

Кроме этого, фирмой возведен экспериментальный жилой дом в городе Ярославль (рис. 5)¹⁰. Заметим, что дом запроектирован и построен с соблюдением нормативной документации индивидуального жилищного строительства. Создан проект, по которому с помощью аддитивных технологий возведены стены, далее получено разрешение на строительство, оформлен паспорт в БТИ и в скором времени дом будет поставлен на кадастровый учет⁷.

¹⁰ Печать домов на 3D-принтере в России, Китае и других странах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://top3dshop.ru/blog/3d-printing-houses-in-russia-china-europe-price-video.html>. – Дата обращения: 27.03.2021.



Рисунок 5. Напечатанный дом в Ярославле

(источник: <https://top3dshop.ru/blog/3d-printing-houses-in-russia-china-europe-price-video.html>)

«Апис Кор Инжиниринг» (Apis Core) – российская компания является разработчиком строительного 3D-принтера, который способен «напечатать» дом на строительной площадке. Габаритные размеры такого принтера составляют 4×1,6×1,5 м, а его масса – 2 тонны, поэтому транспортировка не составляет неудобств и сложностей. На установку и настройку устройства перед строительным процессом требуется не более 30 минут. Следовательно, пользование принтером является достаточно легким процессом. Также важно отметить, что здания и сооружения больших размеров можно создавать с применением нескольких синхронизированных вышеописанных принтеров. После реализации первого дома Apis Core создала собственное программное обеспечение, которое помогает легко управлять 3D-принтером.

Стоит отметить, что использование принтера позволяет производить печать в любое года, так печать этого дома происходила в феврале при достаточно низких температурах.

Использование технологий послойного производства при укладке дорожных одежд

Дороги строятся во всем мире каждый день и, соответственно, темпы производства увеличиваются¹¹. Количество введенных в эксплуатацию дорог увеличивается с каждым годом и по этому показателю опережает весь мир опять же Китай, где за час строится более 700 метров высокоскоростных магистралей¹². В связи с постоянно увеличивающимися темпами строительства дорог, требовалось развивать и технологии, по которым ведутся работы, а также материалы. Так, еще в начале XX века, когда асфальтовые дороги становились все более популярными, технологии укладки дорожных одежд были далеки от современных. Основной способ укладки был ручной – разогретый асфальт доставлялся на самосвалах в нужное место, далее разравнивался ручным способом и уплотнялся механизированным¹³. Впоследствии в 1933 году, в США, впервые был опробован асфальтоукладчик, изобретенный несколько годами

¹¹ https://radubrava.ru/wp-content/uploads/2017/12/2016_dorogi.pdf [Электронный ресурс]. Дата обращения: 27.03.2021.

¹² Дороги в России и в Мире [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://newizv.ru/article/tilda/07-01-2020/dorogi-v-rossii-i-v-mire-pochemu-u-nas-medlennee-menshe-huzhe-i-dorozhe>. – Дата обращения: 27.03.2021.

¹³ Беспрецедентные темпы строительства дорог в Китае [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cargolink.ru/ls/blog/1417html>. – Дата обращения: 27.03.2021.

ранее американским инженером [10]. Асфальтоукладчики используются повсеместно в мире до сих пор, а технологии укладки асфальтобетона стремительно развиваются.

Технология укладки асфальтобетона – послойная, от менее прочных слоев к более прочным. Нарастивать асфальтобетон по слоям следует, во-первых, для экономии более прочного материала, а, во-вторых, для послойного уплотнения. Таким образом, асфальтобетонные слои укладываются друг на друга, при этом согласно технологии температура материала слоев должна быть не меньше 120 градусов.

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что технология укладки асфальтобетона полностью соответствует технологии FDM при 3D-печати, то есть методу послойного нанесения материала (Material extrusion). Экструдер выкладывает материал послойно, позволяя слоям спекаться друг с другом, а позже затвердевать. Асфальтоукладчик выступает аналогом экструдера, он нагревает, дозирует и распределяет расплавленную смесь, которая в последствии остывает и затвердевает.



Рисунок 6. Экструдер, печатающий бетоном по технологии Material Extrusion (источник: 3dtoday.ru)



Рисунок 7. Асфальтоукладчик, укладывающий слой смеси (источник: news.cision.com)

И экструдер (рис. 6), и асфальтоукладчик (рис. 7) обладают технологиями для точного позиционирования их в пространстве. Для позиционирования экструдера, вне зависимости от его размеров и применения, используется жесткая рама, шаговые двигатели, известные координаты осей. Толщина слоя определяется двигателем и задается в программе, ширина слоя зависит от диаметра сопла. Аналогично и при строительстве дорог: асфальтоукладчик играет роль экструдера, позиционируется с помощью лазеров, прочей автоматики, высота слоя настраивается внутренними приводами вплоть до миллиметра, а за ширину слоя отвечает автоматический дозатор, позволяющий ее регулировать.

Следовательно, аддитивные технологии при строительстве автомобильных дорог применяются еще с давних времен, когда в остальных отраслях только начинают набирать популярность.

Примеры использования аддитивных технологий в транспортном строительстве

Освоив послойное создание предметов в различных областях, инженеры не остановились на достигнутом и попытались применить данную технологию в совершенно новой для нее сфере – транспортном строительстве. Так, первый в мире 3D-печатный пешеходный мост был возведен в Испании в 2016 году (рис. 8)¹⁴.



Рисунок 8. Первый мост, напечатанный на 3D-принтере (источник: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-first-3dprinted-bridge-was-built-in-spain/>)

В основу проектирования данного моста заложена концепция биомиметической архитектуры – мост проектировали так, чтобы он «сливался» с природой¹⁵, к тому же данный метод подразумевает рациональное использование материала – материал есть только там, где он необходим. Это одна из причин эффективности аддитивного производства.

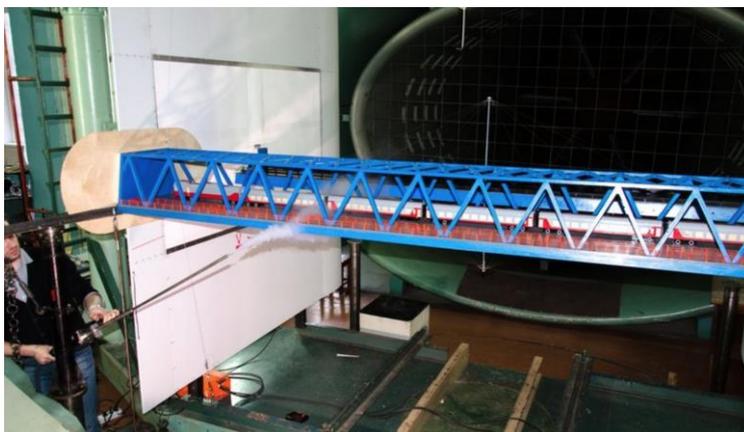
Дело в том, что традиционные способы производства в строительстве не предполагают сложных форм. Но именно сложные формы позволяют использовать материал максимально эффективно – в наше время уже существуют программные комплексы для расчета того, где материала должно быть больше, а где его можно сэкономить.

¹⁴ Первый 3D напечатанный мост возведен в Испании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/the-first-3dprinted-bridge-was-built-in-spain/>. – Дата обращения: 23.03.2021.

¹⁵ ALCOBENDAS ALBERGA EL PRIMER PUENTE PEATONAL DEL MUNDO IMPRESO EN 3D [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://comunicacion.alcobendas.org/nota-de-prensa/alcobendas-alberga-el-primer-puente-peatonal-del-mundo-impreso-en-3d>. – Дата обращения: 27.03.2021.

Для понимания механизма рационального использования материала можно привести пример – простой элемент, работающий лишь на изгиб – двутавр. Двутавровые балки используются в изгибаемых конструкциях гораздо чаще более простых, прямоугольных, из-за экономии материала. Примечательно, что в двутаврах материал работает в основном в верхней и нижней полках (поясах), поэтому среднюю часть можно уменьшить, оставив лишь тонкую стенку для передачи сдвигового усилия между поясами. При рассмотрении более сложной конструкции – моста, пусть даже пешеходного, становится ясно, что данная конструкция может испытывать намного более сложный вид напряженно-деформированного состояния, поэтому сэкономить материал с помощью традиционных способов проектирования и строительства становится очень сложно. Программные комплексы, основанные на нейросетях, могут перебирать огромное количество вариантов, просчитывают их и находят самый эффективный с точки зрения расхода материала, при этом форма такой эффективной конструкции может быть весьма необычной.

Альтернативное применение 3D печати – макетирование. Такой способ давно используется в автомобильной и других отраслях, где, сделав уменьшенную копию конечного изделия, можно оценить дизайн, провести какие-либо испытания копии – модели реальной конструкции с целью получить нужную информацию о поведении реального прототипа.



*Рисунок 9. Аэродинамические испытания крымского моста
(<https://назовимост.пф/multimedia/foto/ispytaniya-modeli-mosta/>)*

В транспортном строительстве также можно использовать макеты мостов, эстакад, полученные с использованием 3D печати. Причем такие примеры уже были в России.

Вантовые, висячие и балочные неразрезные мосты длиной более 100 метров должны рассчитываться на колебания от ветровой нагрузки. При этом, особо уникальные мосты рекомендованы к натурным испытаниям. Чаще всего испытывается уменьшенная копия моста – макет. Так, в России проводились аэродинамические испытания Крымского моста¹⁶ в крыловском научном центре (рис. 9). Части моста были распечатаны на 3D принтере¹⁷, то есть с применением аддитивных технологий, которые позволяют добиться появления верной формы детали намного быстрее, чем изготовление данной детали ручным способом.

Существуют некоторые другие технологии «печати» мостов. Например, первый, собранный из распечатанных блоков в Нидерландах мост, запроектированный как вело-пешеходный (рис. 10).

¹⁶ Следования Крымского моста в ландшафтной аэродинамической трубе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://krylov-centre.ru/press/video/1270/?sphrase_id=39665.

¹⁷ <https://назовимост.пф/multimedia/foto/ispytaniya-modeli-mosta/>. – Дата обращения: 26.03.2021.



Рисунок 10. Первый мост, напечатанный на 3D-принтере в Нидерландах (источник: fishki.net)

Интересен также способ изготовления этого моста, который, скорее всего, в дальнейшем найдет применение для массового строительства мостовых сооружений. Мост состоит из 800 слоев толщиной по 1 см, и он изготавливался на заводе блоками (рис. 11, 12), после этого блоки транспортировались на строительную площадку и из этих блоков создавался мост.



Рисунок 11. Процесс производства моста (источник: fishki.net)



Рисунок 12. Процесс производства моста (источник: fishki.net)

Пролет моста – 8 м, ширина моста – 3,5 м. Авторами было проверено множество новостных источников, как российских, так и зарубежных, но, к сожалению, не удалось найти информации о стоимости такого строительства. Даты – мост был сдан в сентябре 2017 года, начало стадии возведения примерно начало 2017 года. К сожалению, из-за отсутствия сведений о стоимости и продолжительности строительства невозможно провести сравнение с другими технологиями, но, по некоторым данным, скорее всего, данный мост был лишь демонстрацией возможностей аддитивных технологий. Такое мнение складывается, если оценивать сроки строительства. Пролет 8 метров – очень невелик, для таких пролетов рекомендуется использовать обычный балочный или арочный мост [11]. И сроки возведения такого моста будут короче, чем возводился «аддитивный» данный мост. Тем более мост предназначается в основном для велосипедистов, что не подразумевает больших нагрузок при эксплуатации. Но даже с учетом этих фактов строительство данного моста – большое достижение в сфере мостостроения. Со временем это направление будет только развиваться.

Ровно через один год, в тех же самых Нидерландах снова построили «аддитивный» мост. На этот раз это был первый в мире мост, напечатанный из металла (рис. 13).



Рисунок 13. «Аддитивный» металлический мост

(источник: <https://hightech.plus/2018/10/23/v-niderlandah-otkrili-dlya-publiki-pervii-napechatannii-stalnoi-most>)

Его длина – 12 м, вес – 4,5 т, мост запроектирован как пешеходный. Изначальное запланированное время изготовления моста – 2 месяца. Но из-за некоторых сложностей процесс производства затянулся до 12 месяцев. Мост был создан для демонстрации возможностей 3D-печати и впервые был представлен миру в Эйнховене на голландской неделе дизайна в октябре 2018 года. Преимущества производства моста аддитивным способом видны сразу – это полное отсутствие прямых линий, заявляли создатели моста. Выглядит сооружение очень необычно – необычные формы, изогнутые линии¹⁸. Мост используется как пешеходный через один из каналов Амстердама. Такой мост невозможно построить традиционным способом, что показывает преимущества аддитивных технологий.

¹⁸ Интернет журнал «Хайтек+». В Нидерландах открыли для публики первый напечатанный стальной мост [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hightech.plus/2018/10/23/v-niderlandah-otkrili-dlya-publiki-pervii-napechatannii-stalnoi-most>. – Дата обращения: 27.03.2021.



Рисунок 14. Процесс производства моста

(источник: <https://hightech.plus/2018/10/23/v-niderlandah-otkrili-dlya-publiki-pervii-napechatanii-stalnoi-most>)

Заключение

На сегодняшний день аддитивные технологии развиваются достаточно активно во многих сферах промышленности. Однако, сфера строительства достаточно консервативна, следовательно внедрение новых технологий процесс сложный, поэтому внедрение 3D-печати в сферу строительного производства требует намного больше времени и ресурсов. Например, чтобы на законодательном уровне начинать возводить здания и сооружения, необходима нормативная база. Также необходимо развитие базы материалов, применяемых при 3D-печати. Важным ресурсом в применении аддитивных технологий в строительстве является сам 3D-принтер, создание или приобретение которого увеличивает стоимость производственного процесса.

Исследованиями и разработками аддитивных технологий в строительстве активно занимаются не только крупные мировые институты и большие строительные компании, но также проводится много исследований и среди простых обывателей, которым интересно применение 3D-печати при возведении зданий и сооружений⁵.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панков, Д.Э. Лазерная стереолитография (SLA): технология 3D-печати / Д.Э. Панков, И.А. Соломонов, А.М. Терин, А.К. Тутушкин. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2020. – № 48 (338). – С. 48–49. – URL: <https://moluch.ru/archive/338/75621/> (дата обращения: 23.03.2021).
2. Баева Л.С. Современные технологии аддитивного изготовления объектов / Л.С. Баева, А.А. Маринин // Вестник Мурманского гос. технич. ун-та. – 2014. – Т. 17. – No 1. – С. 7–12.
3. Greul M. Metal and ceramic prototypes using the Multiphase Jet Solidification (MJS) process Metallische und keramische Prototypen mit dem Multiphase jet Solidification (MJS) Verfahren. Fraunhofer IFAM // Conference on Rapid Tooling & Manufacturing, 1997.
4. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
5. Мустафин Н.Ш., Барышников А.А. Новейшие технологии в строительстве. 3D принтер // Региональное развитие: электронный научно-практический журнал. 2015. No 8(12).
6. Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С.В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, No 1. – С. 90–101.
7. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, No 1(52). С. 27–46.
8. Степанова, Е.Ю. Аддитивные технологии как прорывные инновации ресурсосбережения 21 века / Е.Ю. Степанова // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век: материалы XIII международной научно-практической интернет-конференции, Орёл, 15 марта – 30 2015 года / ГУ «Орловский региональный центр Энергосбережения». – Орёл: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс", 2015. – С. 124–128.
9. Аддитивные технологии в строительстве. Преддипломная практика для выполнения выпускной квалификационной работы магистров: учебно-методическое пособие / Сиб. федер. ун-т, Инж.-строит. ин-т; сост.: Г.В. Игнатъев, О.В. Гофман, А.А. Якшина. – Электрон. текстовые дан. (pdf, 0,4 Мб). – Красноярск: СФУ, 2018. – Загл. с титул. экрана. – Изд. № 2018-4693: Б.ц. – Текст: непосредственный.
10. Радовский Б.С. Победа над сегрегацией: прогресс технологии укладки асфальтобетона в США благодаря мобильным перегрузчикам смеси // Журнал «Автомобильные Дороги», 2012, N 9, 48–56.
11. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. “Железобетонные конструкции (Общий курс)” Учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1991. – 767 с.: ил.
12. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015 220 с.

Neustroev Danil Vladimirovich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia
E-mail: Neustroev7289@gmail.com

Ovchinnikov Igor Georgievich

Industrial university of Tyumen, Tyumen, Russia
Perm national research polytechnic university, Perm, Russia
E-mail: bridgesar@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0617-3132>

РИИЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=2922

Researcher ID: <https://www.researcherid.com/rid/J-5539-2013>

Additive technologies and their application in industrial and transport construction

Abstract. In our world, the requirements for various industries are growing. Key production indicators: efficiency, economy, quality improvement. To achieve such indicators, it is necessary to reduce costs, use material rationally and reduce the amount of manual labor in production. The bullet to such results is the optimization of old technologies and the introduction of new ones. One of the new technologies that can improve performance in production is additive technology.

This article discusses the problem of using a promising technology – additive printing in the construction of not only industrial and civil buildings, but also transport facilities. To indicate the problem, the article briefly describes the existing technologies used in 3D printing, the types of 3D printing in the world and in construction, examples of the use of this technology in civil engineering in Russia and abroad are considered. In addition, the application of these technologies in areas other than construction is considered. The analysis of applied technologies in road construction is carried out. A comparison of these technologies with additive technologies is made, and evidence is given that layer-by-layer technologies in road construction have been used for a very long time, earlier than in other areas. To prove this, the equipment used in the construction of the roadbed and in the use of 3D printing is compared. The existing experience of using 3D printing in the creation of bridge structures in different countries is also reviewed, with a detailed analysis of the technologies used in printing. The printing process is analyzed from an economic point of view.

A special way of using 3D printing in the design of bridge structures is considered – prototyping. With the help of additive technologies, it is possible to create layouts of structures with a small amount of labor and time. Such mock-ups can be used for testing and visualization. Examples of using layouts are given and analyzed.

Keywords: transport construction; 3D printing; additive manufacturing; modern technologies; construction optimization; bridge structures; civil engineering; asphalt paver