НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
ЧАСТЬ 1

О.Л. Фиговский [1], А.З. Штейнбок [2]

[1] Академик, Израильская ассоциация изобретателей, Хайфа. Израиль, figovsky@gmail.com

[2] PhD, Израильская ассоциация изобретателей, Хайфа. Израиль; Колледж Шенкар, Рамат-Ган, Израиль, shteinbok.arkady@gmail.com

Аннотация

В статье приводятся исследования особенностей процессов эффективного возведения бетонных конструкций различной функциональности в строительстве. Показано, что железобетон и новейшие технологические разработки его возведения представляют собой интересную и важную область современного и будущего сферы создания бетонных конструкций различной функциональности.

Были проанализированы современные технологии возведения бетонных конструкций: фибробетона, “умного” бетона, а также методы модификации для улучшения свойств бетонных конструкций. Показано, что армирование фибробетоном железобетонных колонн может изменить осевое напряженное состояние бетона на трехмерное напряженное состояние и улучшить несущую способность и деформационную способность замкнутого бетона. Отмечено, что актуальным направлением “умных” технологий возведения бетонных конструкций различной функциональности является использование сплавов с памятью формы SMA.

Используя проанализированные технологии, можно создать более прочные и устойчивые конструкции, сократить расходы на техническое обслуживание и накладные расходы, а также способствовать инновациям в строительной отрасли.

Отметим, что проводятся исследования по использованию 3D-строительства для строительных проектов на Луне.

Общий анализ
Создание технологии 3D-печати

Спрос на массовое строительство создаст потребность внедрения новых и более эффективных и более экономичные технологий, в частности 3DP.

В будущем, благодаря популярности этой технологии, частные потребители также смогут достраивать свои дома. 3DP также имеет большой потенциал развития в сфере индивидуального дизайна интерьера, искуства дизайна.

Сегодня известны некоторые условия внедрения 3DP: Исходные условия – время и небольшая потребность в рабочей силе. Для достижения лучшего качества поверхности требуется больше времени, что увеличивает временные затраты. Второе условие — стоимость оптимизации. Любой процесс оптимизации приведет к увеличению стоимости из-за дополнительных проектных работ, и структура может стать излишне сложной.

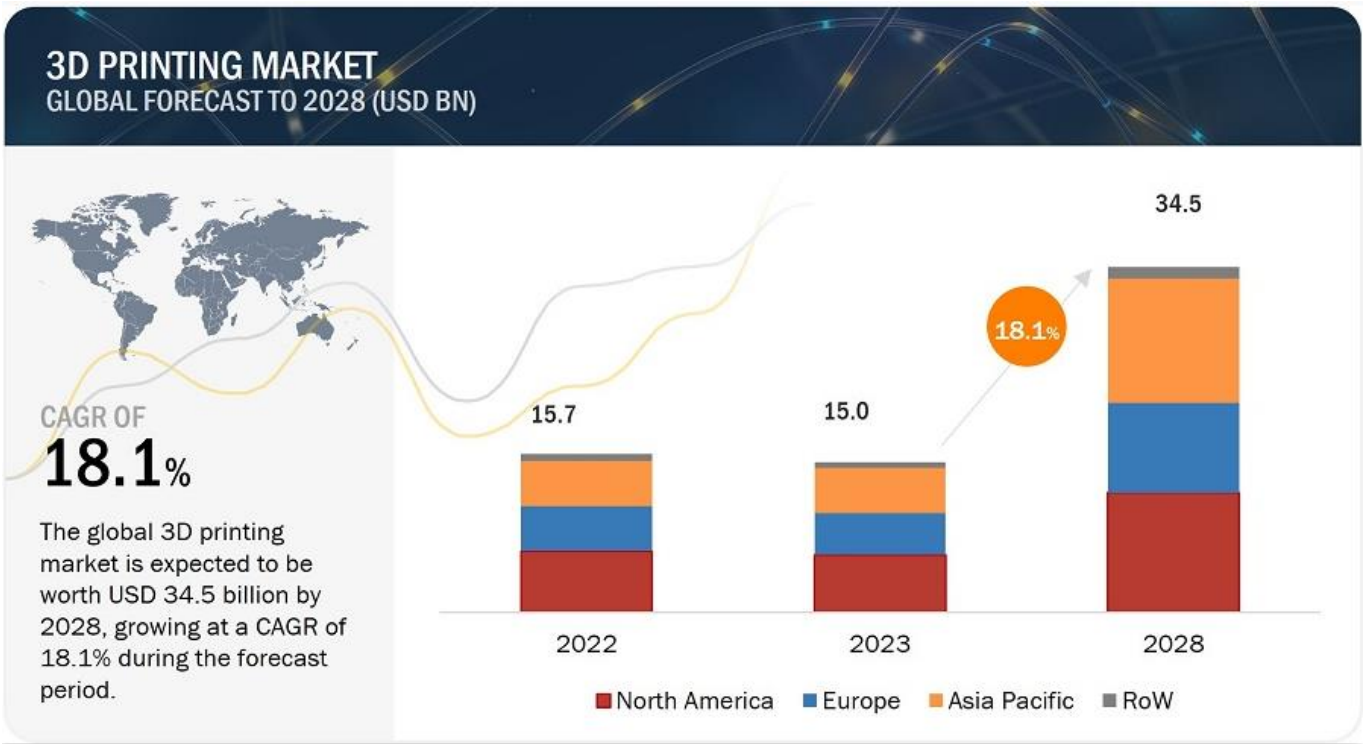

Рис. 1. Инвестиции в технологии 3D-печати

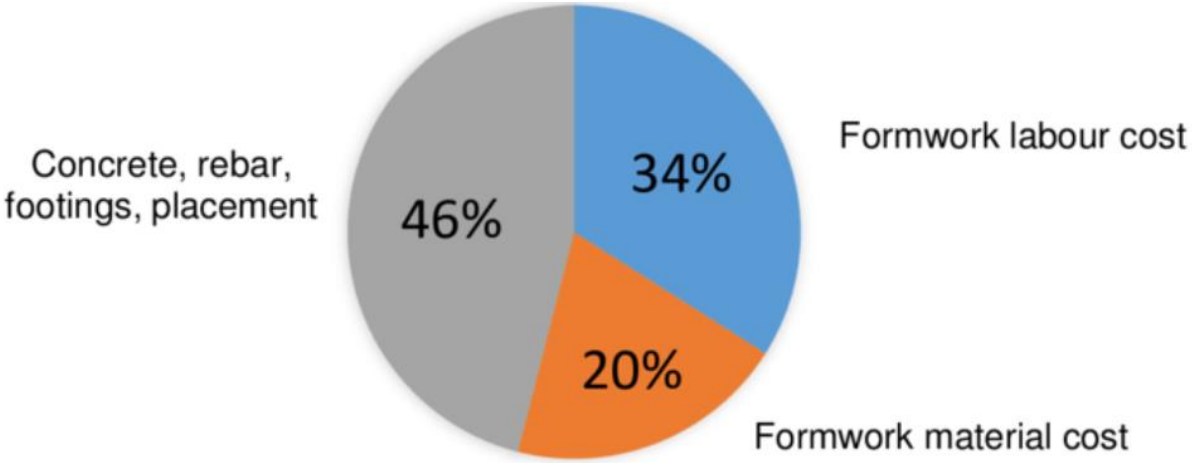

Рис. 2. Типичное распределение затрат на проект нового бетонного строительства

Материалы для использования в 3DP

Материалы для 3D-печати и их свойства представляют значительный исследовательский интерес.

Все материалы, напечатанные на 3D-принтере, должны иметь исключительную скорость печати. Сюда входит возможность подачи и перекачки, экструдируемость, прилипанмость слоёв, минимальное время первичного затвердевания, возможность сборки.

3D-печать и жилищное строительство: интеллектуальная собственность и строительное право

Несмотря на свои потенциальные преимущества, 3DP еще не полностью реализовала свой потенциал в строительной отрасли и не является технологией, способной полностью заменить традиционные методы строительства.

Что касается интеллектуальной собственности, существуют законы и постановления, защищающие новые изобретения и изобретателей. Одной из областей будущих изменений будет установление принципов защиты интеллектуальной собственности для 3D-моделей

В то время как технологии аддитивного производства все чаще используются во многих отраслях промышленности, использование 3D-печати в строительстве все еще находится в зачаточном состоянии. Несмотря на столь раннюю стадию развития, технологические возможности и надвигающееся нарушение статус-кво очевидны.

Отметим некоторые аспекты связанные с правовой и интелектуальной собственностью. Первое, существуют несколько типов технологий 3D-печати, применяемых в строительной отрасли. Затем, взаимодействие вопросов интеллектуальной собственности, таких как авторское право, закон о промышленных образцах, патентное право, закон о товарных знаках и коммерческая тайна, связанных с 3D-печатью в строительстве. Необходим анализ нормативно-правовой базы вокруг потенциальных проектов жилищного строительства, напечатанных на 3D-принтере, влияние технологии на правовую базу, касающуюся строительного процесса. Как результат, необходимы дальнейшие исследования как в области интеллектуальной собственности, так и в вопросах регулирования строительства, связанных с внедрением 3D-печати в жилищном строительстве.

Общая функциональная схема процесса использования технологии 3D-печати в строительстве.

Весь процесс 3D-печати можно описать двумя способами:

- сегмент программного обеспечения (левая часть рис. 3)
- аппаратный сегмент (правая часть рис. 3).

В 3D-программном обеспечении (например, AutoCAD, Revit, Inventor, Solid Works или других) объекты моделируются как 3D-объекты, затем они экспортируются в другое программное обеспечение для нарезки (определите размер слоя - в зависимости от печатного оборудования, материала, желаемое разрешение печати и т. д.). После этого для всего объекта создается программный файл в виде G-кода, который принтер может прочитать и выполнить задание, как показано на рис. 3.

В аппаратном сегменте используется встроенный принтер (портальный или роботизированный) с доставкой материала. система, которая связана с системой подачи материала (например, насос или другие) и ведущая труба необходимы для подачи материала к сопловому отверстию/головке, которая соединена в концевой части шланга для нанесения материала послойно. слой. Также необходим контроллер для управления принтером и насосом в соответствии с конструкцией (формой, размером и т.д. по необходимым параметрам) печатаемого объекта.

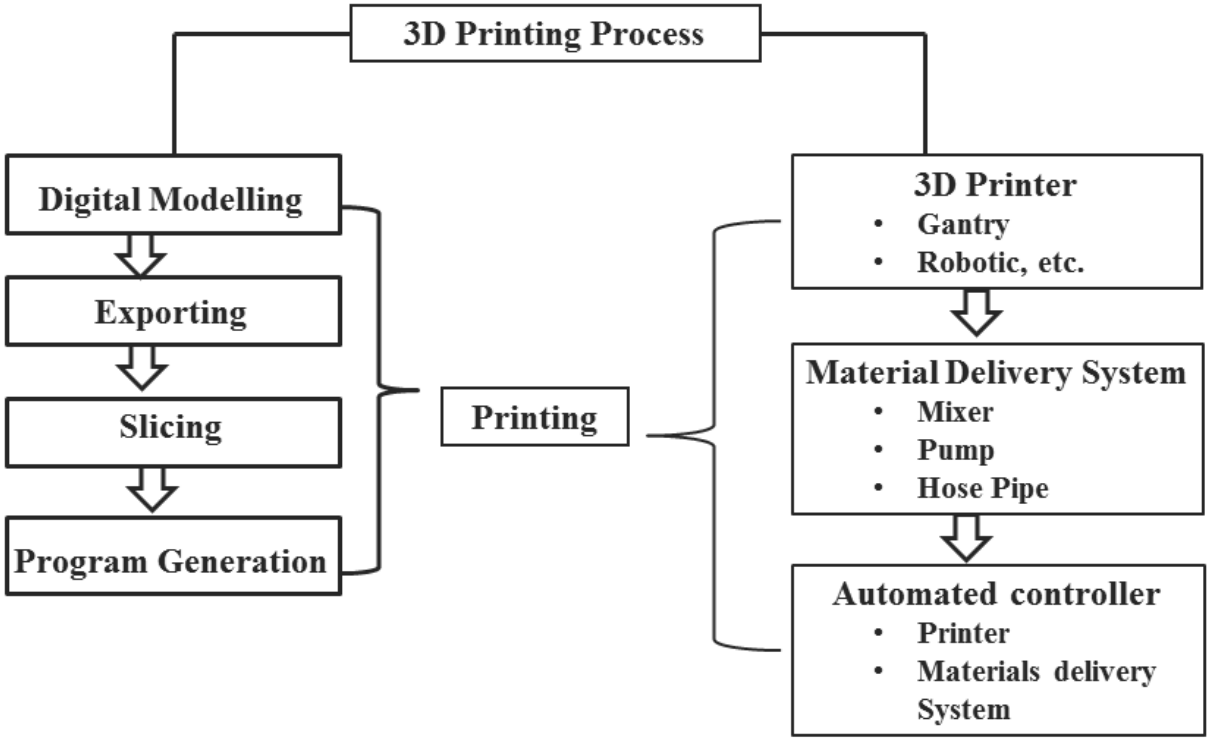

Рис. 3. Процесс 3D-печати для строительной отрасли

Эта технология позволяет использовать переработанные строительные материалы и тем самым экономить 30-60% строительных материалов. Кроме того, значительно (до 70%) сокращаются сроки строительства и до четырех раз сокращается трудозатраты.

Рис. 4. Принципиальная схема процесса строительства методом 3DP.

На сегодняшний день основными недостатками являются: объёмность и неудобство использования машин для 3D-печати зданий, проблема с армированием, сложности возведения здания на высоту, технические проблемы в горной местности, трудности печати горизонтальных элементов (полов и крыш), наружных отделочных работ.

Рис. 5. Процесс 3D-печати стены

Материалы

Большую часть материалов, используемых для 3DP в строительстве, составляют бетон, гипс, сталь и полимерные материалы. А также новые материалы, такие как стабильные композиты на основе цемента, стабильные цементные пасты и различные композиты. А также возможность комбинирования разных материалов, например, стали и нескольких видов бетона, в том числе полимербетона. Так, исследователи из NTU Singapore использовали переработанное стекло вместо песка при 3D-печати бетона.

Бетоны и нанодобавки. В ВТТМ СО РАН предложено заменить основу в цементных вяжущих на силикатную. Это улучшит качество используемого материала: нагрев при более низкой температуре при изготовлении, более высокую прочность на сжатие, отсутствие набухания при нагреве.

Замена обычной арматуры на базальтовую. Такая арматура легче, радиопрозрачна и устойчива к коррозии по сравнению с обычной. Ударопрочные характеристики такой арматуры возрастают в 4,5 раза, а долговечность – в 5 раз.

Различные наноструктурированные добавки в бетон: Например, 0,1% Кемерита в общей массе цемента такой добавки повысит прочность конструкций на 25%.

Полимербетон – это бетон, защищенный американским патентом.

Резинобетон — первый в мире полимерный бетон, в котором в качестве связующего используется жидкая резина (полибутадиен), а не эпоксидная, полиэфирная или фурановая смола. Такой бетон имеет прочность на сжатие до 90 МПа и прочность на растяжение до 30 МПа. (Это особенно важно, поскольку эта прочность на разрыв значительно выше, чем прочность на разрыв обычного портландцементного бетона).

Водопоглощение полимербетона не превышает 0,06%. Полимербетон обладает высокой химической стойкостью, как к щелочам, так и к кислотам. Фактически само полимербетонное вяжущее может использоваться как самостоятельное химически высокостойкое защитное покрытие, обладающее высокой адгезией к стали (до 11,5 МПа при отрыве) и работоспособное до температуры 95°С.

Таблица 1. Основные физико-химические и механические свойства RubCon

Индексы	Единицы изиерения	RubCon
Плотность	kg/m^3	2100-2300
Максимальное напряжение - сжатие - изгиб - растяжение	MPa	 80-95 25-30 12-15
Модуль эластичности	10^4 MPa	2.0-2.7
Коэффициент Пуассона		0.26-0.28
Коэффициент теплопроводности	W/m/°C	0.3-0.5
Износостойкость	$(kg/m^2)10^{-3}$	2-3
Specific toughness Удельная прочность	$(J/m^2)10^3$	3.5-4.5
Термостойкость	°C	80-100
Поглощение воды	%	0.05-0.06
Коэффициент химической стойкости при 20 ºC (из расчета на 360 дней воздействия) - 20% H_2SO_4 - 10% Lactic acid Молочная кислота - 20% Caustic potash едкого поташа - 35% H_3PO_4		 0.97-0.98 0.95-0.96 0.97-0.98 0.96-0.98 0.99-0.995 1.00-1.05
Устойчивость к истиранию	$(kg/m^2)10^{-3}$	2-3.5

Бетонное и дисперсное армирование.

Разработка перспективных бетонных смесей, способных выдерживать действие внешних нагрузок (в том числе динамических), является важной научной проблемой современного строительства.

Разработаны и представлены различные виды распределенного армирования. Эти разработки включают методы математического проектирования и экспериментальные испытания. Дисперсное армирование позволяет использование такого бетона в 3DP и увеличивает прочность на сжатие: на 35% (комбинации стальной и базальтовой фибры с объемной концентрацией 2%).

Максимальная прочность на изгиб увеличилась на 79%, предел прочности при осевом сжатии увеличился на 52%, при осевом растяжении на 39%, модуль упругости увеличился на 33 %. Аналогичные результаты были получены и для других комбинаций диффузного армирования. Проведенные исследования позволили определить наиболее эффективные сочетания волокон разных типов и их оптимальную объемную концентрацию.

Динамическая нагрузка полимержелезобетона

Лабораторный эксперимент был проведен в Воронежском университете, Россия. Размеры образцов составляли 16x4x4 см. Эксперимент проводился при нагрузках, соответствующих требованиям к шпалам высокоскоростных поездов ($2*10^6$ циклов нагружения). Было проведено два типа испытаний: на изгиб и на сжатие. Вот некоторые результаты экспериментов:

При динамическом изгибе:

Прочность образца со стальными волокнами 40/0,8 мм относительно $K_{b,pul}$ = 0,301 и равна $R_{bn,pul}$ = 12,15 МПа.

Прочность образца с латунными волокнами 15/0,3 мм относительно $K_{b.pul}$ = 0,413 и составляет $R_{bn,pul}$ = 10,91 МПа.

При динамическом прессовании:

Относительная прочность образца со стальной фиброй 40/0,8 мм составляет Rpr,pul= 77,97 МПа.

Относительная прочность образца с латунными волокнами 15/0,3 мм составляет Rpr,pul = 75,83 МПа.

Относительная прочность образца с полипропиленовыми волокнами 12/0,12 мм составляет Rpr,pul= 62,91 МПа.

Для сравнения, у обычного бетона прочность на осевое сжатие при таких нагрузках находится в пределах 15-40 Мпа.

3D-печать и автоматическое армирование бетонной смеси.

Технология 3D-печати бетонной смеси с автоматической системой интеграции армирования. Исследователи проверили влияние смеси на динамику строительного принтера. Поставка арматуры организована таким образом, чтобы обеспечить практически беспрепятственное применение. Для этого с задней стороны насадки открывается роликовый питатель. В ходе работы конструктивного 3D-принтера с акселерометра были получены данные в виде графиков частоты колебаний строительного принтера, которые характеризуют основные параметры работы. Экспериментальные кривые смещения приведены для армированных образцов размерами 40×40×160 мм.

Внесение пенопласта в конструкцию для создания хорошей изолирующей способности.

Пенопечать для создания панелей с хорошей изоляционной способностью. Прототип плиты, созданный командой DBT, показывает, как можно комбинировать универсальные бетонные конструкции и пенопласт, напечатанный на 3D-принтере. В плите используются ребра, образованные изостатическими линиями, которые указывают направление сжатия и растяжения. Судя по диаграмме главных напряжений, геометрия этой плиты имеет 24 полости для пенопластовых вставок 12 различных форм.

Этот процесс можно повторить для других стандартизированных или более сложных бетонных структурных элементов. Расчет основных напряженных конструкций может быть использован для проектирования и изготовления различных элементов конструкций с эффективным использованием материалов. Они могут варьироваться от стандартных элементов до индивидуальных плит и стен. Поскольку при использовании FoamWork не образуются отходы, вся производственная система потенциально может быть безотходной. Помимо

минимизации отходов материала, более легкая масса элементов конструкции упрощает транспортировку, погрузочно-разгрузочные работы и сборку на строительных площадках.

Потолок бетонной плиты HiRes был спроектирован компанией DBT для одного из двух закрытых офисных помещений в блоке HiLo. HiLo — это двухэтажное гибкое рабочее пространство для совместной работы, расположенное в Дюбендорфе, Швейцария, в рамках платформы Next Evolution Sustainable Building Technologies (NEST). Главной архитектурной особенностью объекта является сводчатая бетонная крыша HiLo, конструкция, разработанная BRG. В корпусе находится общее открытое пространство двойной высоты и два бокса для частных офисов. Один из этих офисов покрыт плитой HiRes и использует адаптивный солнечный фасад, разработанный A/S.

Рис. 6. сводчатая бетонная крыша HiLo и адаптивный солнечный фасад

Рис. 7. Потолок бетонной плиты HiRes

<u>3D-печать</u> строительных элементов и зданий цементом ВСТ

Изобретение относится к материалу на основе цемента для 3D-печати и способу его изготовления. Этот материал на основе цемента для 3D-печати состоит из гелеобразующего материала в виде порошка и заполнителя, гелеобразующий материал в виде порошка состоит из цемента, активной добавки, восстановителя воды, ускорителя затвердевания, регулируемого агента затвердевания, расширяющего агента, связующее, воздухововлекатель, агент, сохраняющий пластичность, водоотталкивающий агент, эфир крахмала, порошковый наполнитель и волокно, а заполнитель состоит из мелкого заполнителя и грубого заполнителя. По сравнению с предшествующим уровнем техники, материал на основе цемента для 3D-печати обладает преимуществами хороших рабочих характеристик, технологичности, механических свойств и долговечности.

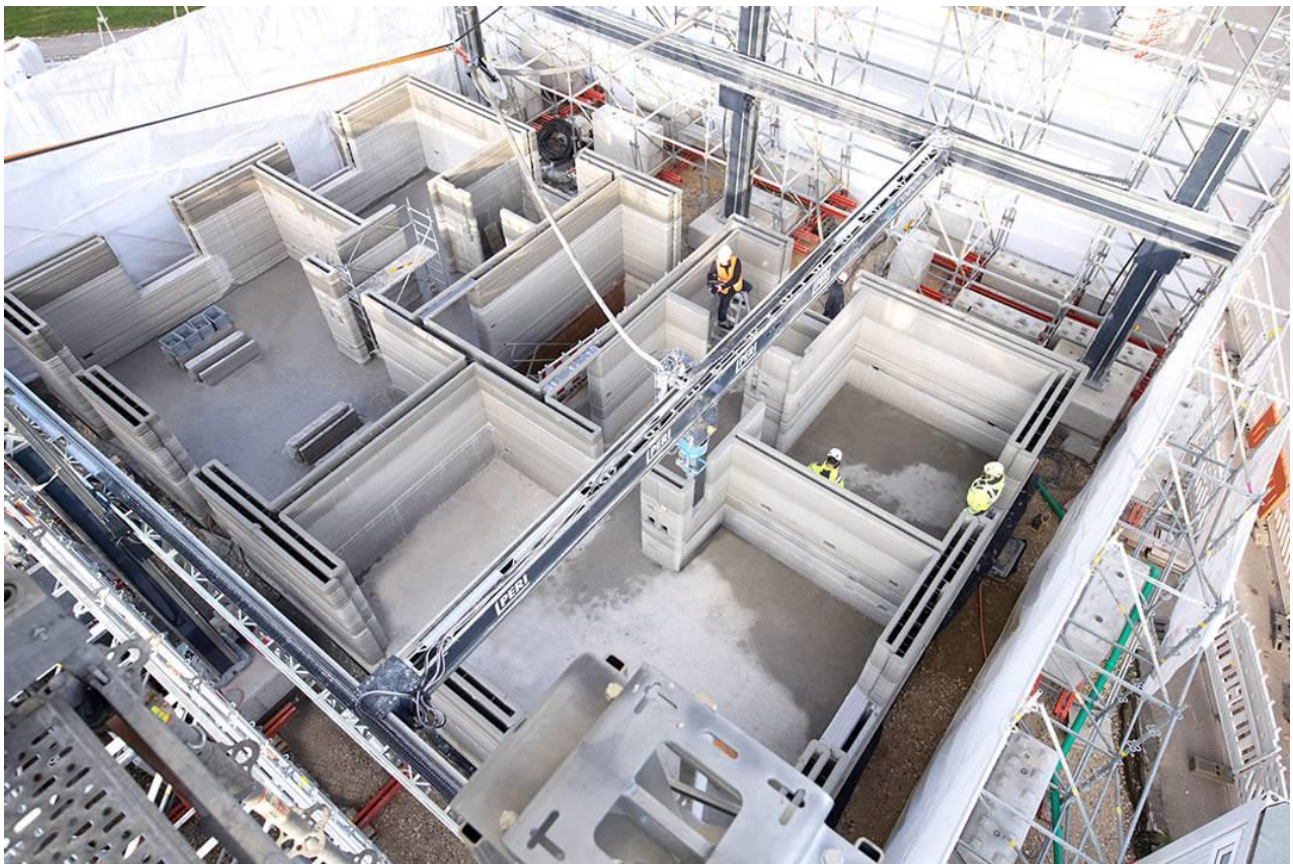

Рис. 8. Процесс 3D-печати стен

Экологические аспекты и тенденции 3DP

3D-технологии не только не создают отходов, но и позволяют повторно использовать материалы, и это справедливо, например, по таким показателям, как потребление энергии, выбросы углекислого газа, использование и производство токсичных веществ. Одним из направлений будущих исследований является использование оценки жизненного цикла (LCA) для оценки воздействия 3DP на окружающую среду. LCA — один из наиболее широко используемых инструментов экологической оценки зданий.

Метод оценки LCA предполагает сбор, обработку и анализ огромных объемов данных. Это требует много времени и усилий. Поэтому для поддержки LCA необходимы инструменты информационного программного обеспечения, такие как BIM (Building information modeling). BIM – это метод управления строительством, основанный на жизненном цикле с широким спектром этапов, включая проектирование, планирование и эксплуатацию, энергопотребление и выбросы энергии и т. д. В настоящее время проводятся соответствующие исследования по методу оценки воздействия зданий на окружающую среду, который называется Оценка воздействия на окружающую среду BIM-LCA и 3DP показала, что они могут повысить эффективность и точность.

Рис. 9. 3D-печать пеной внутри бетонной конструкции

Ниже приведены несколько примеров использования технологии 3D-печати в строительстве.

Компания STRABAG И PERI построила первое здание в Австрии используя технологию 3D-печати.

Рис. 10. Пример: 3D-принтер может напечатать небольшой дом за несколько часов

Новый 3D-принтер UMaine побил бывший мировой рекорд Гиннеса, продвигая новое поколение передовых производств.

Строительство небольшого однокомнатного дома, на которое обычно уходит около месяца, принтер завершит меньше, чем за четыре дня, заявили разработчики. Университет штата Мэн побил собственный мировой рекорд, создав еще один гигантский полимерный 3D-принтер.

Factory of the Future 1.0 (FoF 1.0), как и его предшественник, предназначен для экологичного строительства домов в штате, который страдает от дефицита рабочих.

В 2019 году инженеры из Университета штата Мэн попали в книгу рекордов Гиннеса за создание самого крупного полимерного 3D-принтера, который напечатал дом площадью 56 м² из перерабатываемых материалов. FoF 1.0 печатает в четыре раза быстрее: аналогичный дом он напечатает примерно за 80 часов.

Принтер может печатать из термопластичного полимера объекты размером до 30 м в длину, 10 м в ширину и 5,5 метров в высоту, потребляя 220 кг материала в час. Разработчики отмечают, что кроме скорости строительства технология отличается меньшими выбросами — это важно для отрасли, которая производит до 37% парниковых газов. Готовые объекты можно переработать, добавляют разработчики: если их измельчить и расплавить, материалы можно использовать повторно. Применение принтера не ограничивается строительством жилья, можно также создавать крупные детали для промышленных станков, кораблей, электростанций.

Рис. 11. Презентация 3D-принтера. Фото: Umaine

Разработчики добавляют, что готовые объекты можно переработать: если их измельчить и расплавить, материалы можно использовать повторно. Применение принтера не ограничивается строительством жилья, можно также создавать крупные детали для промышленных станков, кораблей, электростанций.

В Дубае запустят крупнейший в мире экологический проект

Крупнейший город Объединенных Арабских Эмиратов уже может похвастаться самыми высокими в мире небоскребом и жилой башней. Теперь местная компания URB собирается преобразовать береговую линию Дубая благодаря мегапроекту по восстановлению прибрежных зон. Амбициозный проект, охватывающий расстояние в 72 километра и шесть пилотных зон, предполагает посадку более 100 миллионов манговых деревьев, чтобы защитить береговую линию Дубая от эрозии и повышения уровня моря. Также в планах — строительство образовательно-развлекательных и природоохранных объектов, парков и общественных пространств.

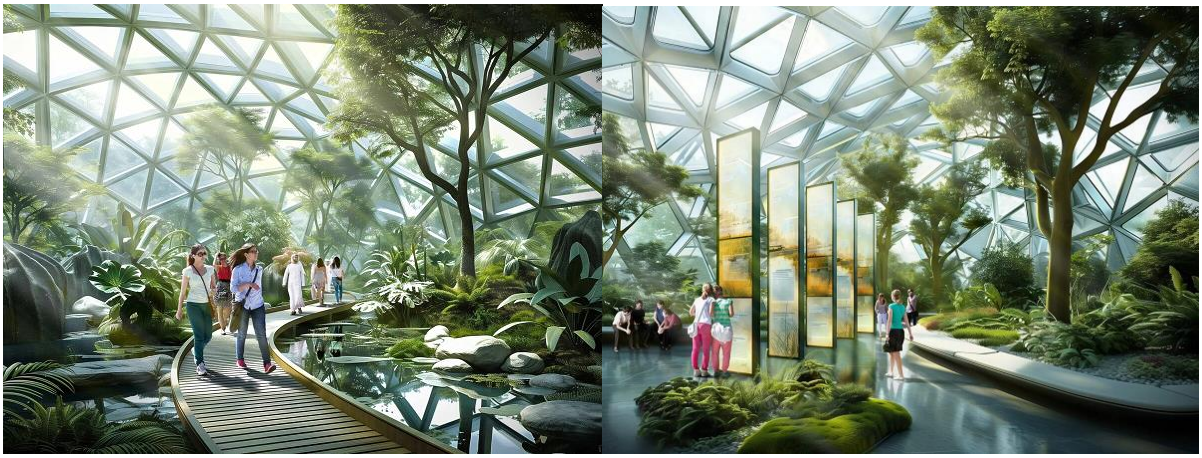

Рис. 12. Рендер проекта по восстановлению береговой линии эмирата Дубай / © URB

Рис. 13. Рендер проекта по восстановлению береговой линии эмирата Дубай / © URB

Большое здание напечатанное на 3D-принтере в Дубае (2020).

Двухэтажное здание площадью 640 квадратных метров используется в качестве офиса для общих административных функций муниципалитета Дубая.

Подчеркнём, что на постройку ушло всего два дня.

Рис. 14. Здание (2020), напечатанное на 3D-принтере в Дубае.

Работа над таким крупным проектом представляла собой дополнительные трудности. Строительная площадка занимала площадь около 700 квадратных метров, что при нормальных условиях строительства потребовало бы установки достаточного количества строительных лесов. Однако, поскольку специальный 3D-принтер компании размером с автомобиль является мобильным, здание было построено непосредственно на месте быстрее и эффективнее, чем традиционный строительный проект.

Вместе с тремя рабочими и одним строительным краном машина распечатывала конструкцию по секциям, используя смесь на основе гипса Apis Cor. Позже для установки окон и крыши были использованы традиционные методы строительства, а для усиления стен были добавлены арматурные опоры.

Ирландский город Дроэда

Ирландский город Дроэда – маловероятное место для строительной революции. Примерно в 34 милях к северу от Дублина он наиболее известен церковью, в которой находится голова католического мученика Святого Оливера Планкетта. Однако в Дроэде также находится учебный центр Harcourt Technologies (HTL), компании, имеющей лицензию на предоставление методов 3D-печати в Великобритании и Ирландии.

Но это не обычные методы 3D-печати, которые используются, скажем, для изготовления точно калиброванных медицинских имплантатов или специальных инженерных деталей. Оборудование HTL было разработано датской фирмой COBOD (Строительство зданий по требованию) и в настоящее время способно печатать здания высотой до трех этажей.

Рис. 15. Ирландский город Дроэда

Этот огромный аппарат, по сути, представляет собой сопло, соединенное с трубой, перекачивающей печатную смесь, подвешенной на гигантском портале, который управляет ее движениями. Порталы могут скользить в соответствии с требованиями плана здания, и сопло движется вдоль них, создавая по ходу движения равномерные слои стены, как гигантская морозилка для торта. Удивительно для оборудования такого размера, но в движениях сопла, когда оно поворачивается и совершает пируэты, есть что-то почти балетное. Стены с характерной многослойной отделкой при желании могут быть выровнены или облицованы.

Но именно скорость процесса обещает революцию. После того, как устройство настроено (а в COBOD утверждают, что опытные специалисты могут сделать это за четыре часа), система может строить по этажу в день для семейного дома среднего размера. Это и наружные стены, и все внутренние перегородки, с полостями для утепления и проемами для окон и дверей.

Нет рабочих – нет проблем

“Это решает проблему нехватки рабочей силы”, — говорит Пол Келли из HTL. “Никто не знает каменщика моложе 45 лет, никто не хочет в него идти. Это позволяет обойти серьезную проблему в строительстве”.

Более того, говорит Келли, даже лучшие каменщики обычно вносят очень незначительные изменения в первоначальные планы – например, делая оконные проемы немного уже, чем предусмотрено, из-за неравномерной резки кирпичей из-за естественной человеческой ошибки. Затем застройщик должен дождаться завершения строительства каркаса здания и повторных измерений всех проемов, прежде чем можно будет заказывать окна и другую фурнитуру. Это может добавить несколько недель к дате завершения. Однако использование принтера является чрезвычайно точным, и все можно заказать заранее с уверенностью, что оно

подойдет. Здание можно сделать водонепроницаемым за несколько дней, а не недель, а, учитывая проблемы с линиями водоснабжения, даже месяцев.

Есть также заявления об устойчивости технологии. По сути, для строительства стенок принтера COBOD используется цемент. Келли признает, что этот материал содержит огромное количество встроенного углерода, но утверждает, что тот факт, что его, как правило, можно купить на месте, означает, что для его транспортировки потребуется меньше миль.

“Наша миссия — строить быстрее, дешевле, лучше и экологичнее”, — говорит Филип Кнудсен, директор по маркетингу COBOD, из штаб-квартиры компании в Дании. “Выбросы CO_2 [наших зданий] снизились на 50% за последние несколько лет и снизятся еще на 50% [от нынешнего уровня] в ближайшие год или два”.

Используемый материал для 3D-печати примерно на 50 процентов легче обычного бетона и значительно более прочный. В процессе строительства, 3D-принтер “нарисовал” стены слоями материала толщиной в несколько дюймов, а затем медленно наращивал их вверх, пока стены не достигли полной высоты. Когда стены были завершены, строительные бригады заполнили стены изоляцией, установили крышу (готовые элементы).

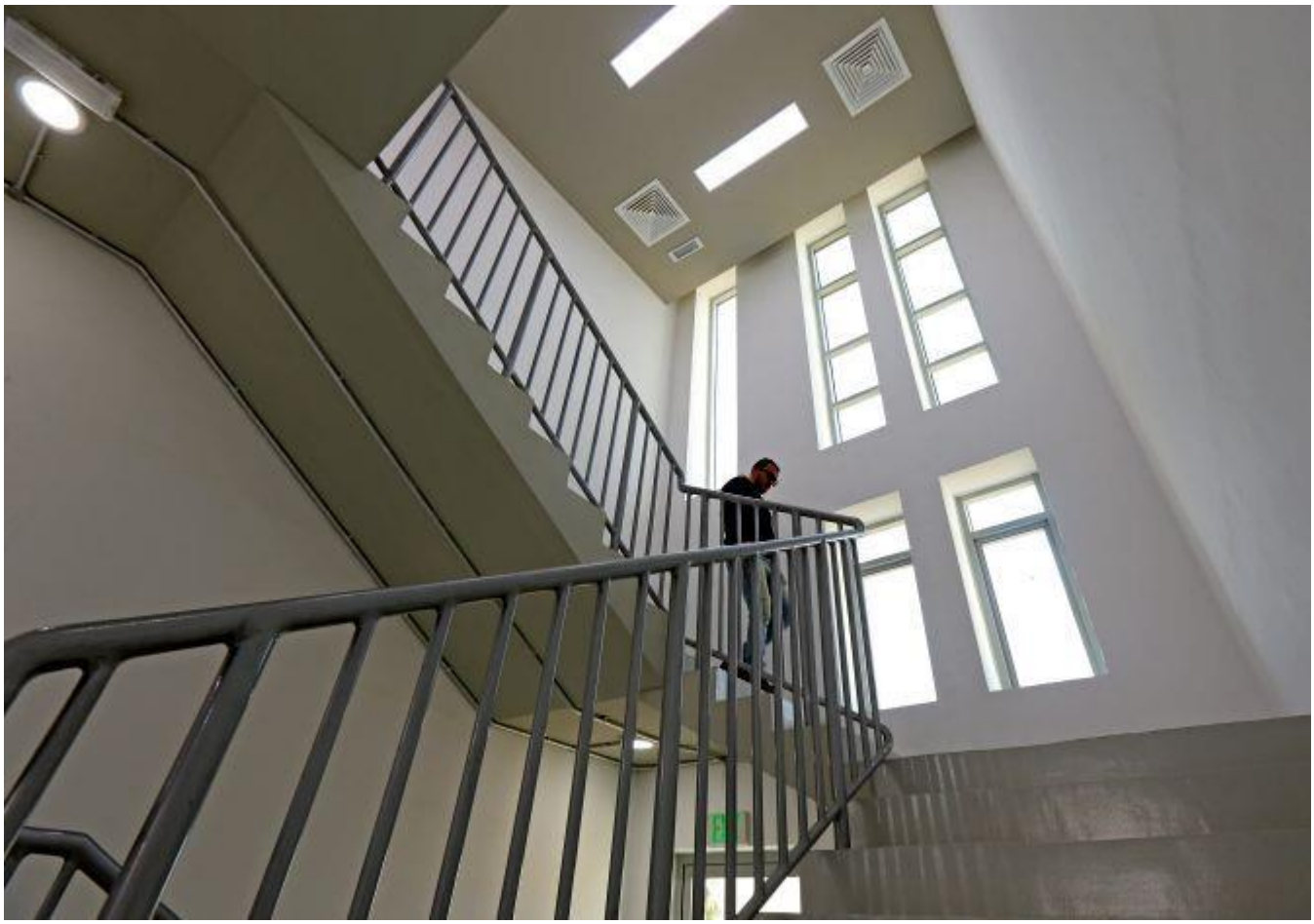

Рис. 16. Вид здания из нутри *Фотография: Сатиш Кумар/Reuters*

Металлический мост, напечатанный на 3D-принтере.

В октябре 2022 года голландская робототехническая компания MX3D (разработчики нескольких новаторских проектов в области аддитивного

роботизированного производства) завершила печать стального моста с использованием шестиосных промышленных роботов.

Рис. 17. 3D-печатный мост в Нидерландах. ***Фото с сайта dezeen.com.***

Впервые проект был предложен еще в 2015 году, и с тех пор мост претерпел несколько различных итераций. Первоначальный план заключался в том, чтобы построить его на месте, но эта идея была сочтена слишком опасной.

Этап строительства уже завершен, и мост установлен через канал в Амстердаме в 2019 году.

Библиография

1. 3D printing reinforcement of concrete mixture, Siberian Federal University, Krasno-yarsk; E.S. Turysheva, A.A., Marchenko, G.K. Gorovaya, N.A. Chelnochkov, D.S. Shulyushenkov,
2. Formwork for Concrete Structures. K.N. Jha, Tata McGraw Hill Education Private Limited, New Dilhi, India, 2012. ISBN (13): 978-1-25-900733-0.
3. To Grow a Building , Jerusalem Design Week 7.2022, jerusalem design week 2022 | design and architecture news and projects (designboom.com)
4. Some new technologies and materials for 3D printing in buildings, Acad O.Figovsky, Dr. A.Shteinbok, (2023)
5. 3D Printing Market Size, Share & Trends Analysis Report By Component (Hardware, Software, Services), GVR, By Printer Type, By Technology, By Software, By Application, By Vertical, By Region, And Segment Forecasts, 2023 – 2030. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis
6. The World’s Largest 3D Printing Companies by Market Cap: 3D Systems & Xometry on Top https://manufactur3dmag.com/the-worlds-largest-3d-printing-companies-by-market-cap-protolabs-3d-systems-on-top/

7. Phenotypically complex living materials containing engineered cyanobacteria https://www.nature.com/articles/s41467-023-40265-2
8. 3D печать и армирование бетонной смеси by Е.С. Турышева, А.А., Марченко, Г.К. Горовая, Н.А. Челночков, Д.С. Шулюшенков1 , Инженерный вестник Дона, №1 (2024) ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8951 Электронный научный журнал “Инженерный вестник Дона”, 2007–2024
9. 3D Printing Additive Manufacturing Technologies, Figovsky Oleg, Shteinbok Arkady, pp.58-65, JULY 2023·CHINA COATINGS JOURNAL
10. Compositions and Methods for 3D Printing of Calcium Phosphate Cement Composite Scaffolds, Dr Stella Alimperti, Dr Yoontae Kim, Dr Eun-Jin Lee, Dr Laurence Chow, Dr Shozo Takagi
11. Liquid Metal Printing - chrome-extension: https://static1.squarespace.com/static/58977341414fb5309fc954e6/t/65aee0cdbd9c1e50b009b2b7/1705959629800/ACADIA+23+Proceedings_LMP.pdf
12. 3D bioprinting of human neural tissues with functional connectivity https://www.cell.com/cell-stem-cell/fulltext/S1934-5909(23)00439-3
13. Typical construction project cost distribution (Paul et al., 2018) [https://www.researchgate.net/figure/Typical-construction-project-cost-distribution-Paul-et-al-2018_fig3_329365708]
14. https://www.dezeen.com/2018/10/22/worlds-first-3d-printed-steel-bridge-completed-mx3d-technology/