

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПРОТОТИПА СТРОИТЕЛЬНОГО 3D-ПРИНТЕРА

В. В. Кулёмин✉, А. В. Кайченев

*Кафедра автоматики и вычислительной техники, cul3min@yandex.ru;
ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», Мурманск, Россия*

Ключевые слова: автоматизация строительных процессов; арктическое строительство; деформационный анализ; метод конечных элементов; низкотемпературные условия; строительная 3D-печать; термокамера; числовое программное управление; шнековый экструдер.

Аннотация: Разработана и исследована конструкция прототипа строительного 3D-принтера, адаптированного для применения в арктических регионах России. Проведен анализ механической части принтера с использованием Autodesk Inventor Professional 2020, включая моделирование деформаций, напряжений по фон Мизесу, контактных давлений и смещений. Показано, что выбранная декартова кинематика и горизонтальный шнековый экструдер обеспечивают стабильность печати при нагрузках с минимальным коэффициентом запаса прочности 7,4 для алюминиевого каркаса. Сделан акцент на решении проблем низкотемпературной экструзии бетона, включая предварительный нагрев смеси до 60...85 °С, и создании термокамеры для ускорения набора прочности.

Введение

Одним из наиболее важных средств автоматизации технологических процессов и производств в 3D-принтерах является система числового программного управления (СЧПУ), которая обеспечивает точное управление процессом печати. С помощью СЧПУ можно достигнуть высокой эффективности производства, минимизировать процент брака, автоматизировать повторяющиеся операции. Разрабатываемые программно-аппаратные комплексы могут быть использованы для создания экспериментальных конструкций, тестирования новых материалов и форм зданий с учетом разных критериев, таких как прочность, долговечность или энергоэффективность.

Прототип строительного 3D-принтера (рис. 1) можно разделить на три составные части: СЧПУ, представленную в работах [1, 2], экструдер и масштабируемую конструкцию. Рассмотрим подробнее разработку механической части прототипа.

Для анализа имеющихся решений в сфере строительной 3D-печати рассмотрены и классифицированы виды технологий трехмерной печати, применяемых в строительстве:

– FFF-FDM (Fused Deposition Modeling): экструдирование послойным методом, в процессе через сопло машины подается вязкая бетонная смесь с добавками;

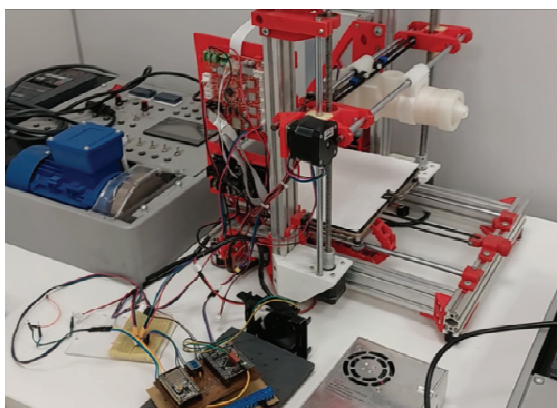


Рис. 1. Прототип строительного 3D-принтера

- 3DP (three-dimensional printing): вяжущее вещество распределяется послойно на слои сухого порошкообразного материала (D-Shape);
- Selective Laser Sintering (SLS): селективное спекание – устройство плавит рабочую смесь (песок) с помощью лазера;
- Shotcrete 3D-Printing (SC3DP) – торкретирование (напыление), в сопле происходит смешивание песка и клеевого состава (или подается готовый раствор), и полученная смесь напыляется на поверхность;
- Additive welding – аддитивная сварка, послойное создание металлических конструкций по технологии MIG-наплавки.

Для большей прочности конструкцию армируют в вертикальном или горизонтальном направлении. При технологии торкретирования смесь можно напылять на готовый решеточный настил или арматурную сетку, которая предварительно сварена другим строительным роботом. Для любой из перечисленных выше технологий можно применить метод многоэкструдерной/многоструйной печати для ускорения процесса постройки объекта.

По конструкции строительные 3D-принтеры делятся:

- на декартовые (XYZ-принтеры, порталные);
- D-Shape (выделяется отдельно из декартовых, ввиду особенности технологии 3DP);
- дельта;
- с полярной системой координат;
- роботы-принтеры типов «промышленный манипулятор» и SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm);
- самоходные строительные машины;
- министроители (Minibuilders) [3];
- роботы-дроны;
- роботы-гуманоиды.

В работах [4 – 7] рассматривается технология контурного строительства (Contour Crafting), ее теоретическое и практическое применение, преимущества порталных систем для крупногабаритной печати.

Декартовые принтеры признаны наиболее стабильными для строительства [8]. Отечественные исследования и практические наработки в сфере аддитивного строительства представлены в табл. 1.

Основными отрицательными факторами для применения строительных принтеров являются:

- ограниченная мобильность и заранее заданные размеры системы координат принтера;

Таблица 1

Сравнительная таблица отечественных компаний

Компания	Модели принтеров	Кинематика принтеров	Год начала работы компании	Подача смеси	Конструкционные проблемы и несовершенства
RVS-3D [9]	RVS 2.1, RVS 1.1	Портальная	2020	Вертикальный экструдер	Зависимость от погодных условий при уличной печати, ограниченная высота печати (до 3 этажей), необходимость калибровки и сложность транспортировки крупногабаритных принтеров
ЛЕРТО [10]	SCARA-принтеры	SCARA	2020	Двухшнековый горизонтальный экструдер, смешивающий сухую смесь и воду	Ограниченная площадь печати, не подходит для масштабного строительства зданий целиком, требует использования специальных смесей с мелкой фракцией
АМТ «Спец-авиа» [11]	S400	Портальная	2015	Вертикальный экструдер	Зависимость от качества бетонной смеси, сложность в настройке и эксплуатации
ApisCor [12]	Мобильные	Цилиндрическая	2015	Бетононасос	Высокая стоимость оборудования, ограниченная мобильность принтеров
StroyBot [13]	—	Портальная	2014		Ограниченная скорость печати, необходимость ручного вмешательства для армирования

– армирование и финишная обработка часто требуют участия человека, что снижает автоматизацию процесса;

– большинство принтеров не могут работать при экстремальных температурах или высокой влажности;

– экструзия большинства принтеров осуществляется напрямую от подаваемой бетононасосом смеси.

В процессе анализа технологий, конструкций, свойства материалов и их стоимости предлагается технология строительства недвижимости посредством совместного использования портальных или цилиндрических 3D-принтеров с параллельным использованием сваривающих арматуру роботов, а также выравниванием стен и отделкой с помощью торкрет-машин. Такое строительство будет дороже, чем использование только одного вида машин, однако повысит прочность здания и качество готовых объектов, сократит число отделочных работ и время строительства.

Ключевой проблемой при строительстве в Арктической зоне является ограничение температурных условий окружающей среды при использовании бетонных смесей. Чем ниже температура, тем больше времени бетон будет достигать прочности, а при температуре ниже 0 °С печать бетонными смесями становится невозможной по причине кристаллизации льда, поэтому следует не только поддерживать микроклимат в рабочей зоне, но и нагревать подаваемую смесь при укладке. Необходимо создание специального инструмента для дальнейших исследований технологии печати в арктических климатических условиях, когда температурно-влажностные показатели являются неподходящими для печати бетоном на существующих принтерах.

Объекты и методы

Для системы строительной 3D-печати выбрана декартова кинематика (также известная как картезианская, прямоугольная, портальная), являющаяся одним из наиболее распространенных видов кинематики, используемых в 3D-принтерах. Выбор был сделан на основе требований к конструкции строительного 3D-принтера, его производства и внедрения в сферу строительства. Декартова кинематика относительно проста в реализации и управлении, использует прямые линии для перемещения экструдера, что делает управление принтером более простым для оператора. Декартова кинематика позволяет обеспечить большую область печати, чем другие виды кинематики, такие как дельта-кинематика. Это позволяет пользователю создавать более крупные объекты. Экструдеры принтеров декартовой кинематикой могут двигаться по всем трем осям с высокой точностью печати за счет линейности перемещений. Декартова кинематика позволяет запрограммировать каждую ось движения независимо, что делает ее простой в настройке.

Для исследования системы управления строительной трехмерной печати спроектированы прототипы: шнекового горизонтального экструдера, опытной (лабораторной) версии 3D-принтера и производственной версии.

Так как деформации конструкции больше всего влияют на точность управления принтером и, следовательно, на качество печати, то наиболее целесообразно провести исследование влияния деформации.

Важным этапом является выбор математического и программного обеспечения системы автоматизированного проектирования (САПР) для моделирования экструзионных 3D-принтеров. Оно должно позволять создавать сложные геометрические модели и обеспечивать высокую точность расчетов, что поможет избежать несоответствий при реальной печати. Данным требованиям отвечают многие САПР, такие как КОМПАС-3D, Solid Works, T-FLEX CAD, Autodesk Robot Structural Analysis Professional и др. Для проведения исследования выбраны системы автоматизированного проектирования Autodesk Fusion 360, Autodesk Inventor Professional 2020. В данных САПР имеются встроенные модули для проведения автоматизированного анализа на деформации под воздействием различных нагрузок. Стоит отметить, что на качество анализа кинематики влияет качество модели. В автоматизированном анализе поведения конструкций при воздействии на нее сил для расчета используется метод конечных элементов (МКЭ).

Метод конечных элементов представляет собой численный подход к решению дифференциальных уравнений, которые возникают при математическом описании поведения различных объектов в разнообразных сценариях [14]. Такие объекты включают в себя жидкости и газы в движении, высокоэластичные материалы, а также механические детали машин, подвергающиеся воздействию внешних нагрузок. С использованием МКЭ можно проводить расчеты, определяющие распределение напряжений, деформаций, скоростей, температур, электрического потенциала, вибраций и других характеристик этих объектов в процессе их эксплуатации.

Применение МКЭ требует выполнения большого объема вычислений, который невозможно осуществить без использования вычислительных мощностей компьютеров и специализированных программных систем автоматизированного проектирования. Autodesk Inventor предоставляет функциональность, характерную для САПР, и позволяет проводить расчеты напряжений и деформаций в созданных моделях деталей и сборок, а также определять частоты собственных колебаний этих объектов. В данном контексте следует рассматривать методы для расчета напряжений в деталях и сборках, подвергающихся воздействию внешних статических нагрузок. В программных продуктах Autodesk присутствует настройка выбора метода разбиения модели: метод Кунса, метод Делоне,

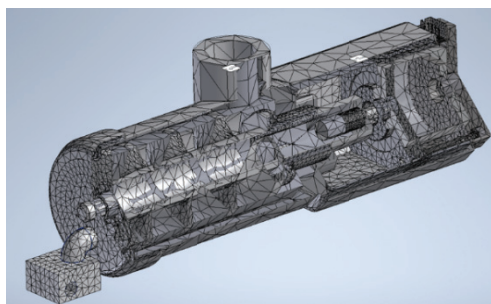


Рис. 2. Внешний вид сетки, построенной методом триангуляции Делоне на тетраэдры

«измельчение сетки» (при выборе этого метода, вблизи концентратора сетка будет построена по методу Канга, а вне этой области – по методу Делоне). Непосредственно в Autodesk Inventor используется метод триангуляции Делоне на тетраэдры (рис. 2). Параметры сетки следующие:

- допуск 0,1 мм;
- допуск соединителя оболочки 1,8 мм;
- средний размер элементов 0,1 мм;
- минимальный размер элементов (от среднего размера) 0,2 мм;
- коэффициент разнородности 1,5;
- максимальный угол поворота 60° ;
- критерий останова при настройке сходимости 10 %;
- порог уточнения 0,8.

Результаты и обсуждение

При разработке конструкции и кинематики принтера целесообразно итерационно проводить их моделирование и анализ на статические деформации. На первом шаге проводился анализ семи существующих конструкций и трех кинематических схем с неподвижным «столом» (рис. 3) [15, 16]. Схемы, приведенные на рис. 3, а, б, являются наиболее подходящими под создание строительного 3D-принтера, чем схема, показанная на рис. 3, в, так как имеют больше точек опоры, что позволяет более равномерно распределить нагрузку и предотвратить опрокидывание.

Схема (см. рис. 3, а) позволит печатать подвальные помещения, находящиеся под уровнем опоры, а также больше подходит для дополнения конструкции строительным краном, однако нагрузка на оси X и Y существенно возрастает, что приводит к искривлению осей, большему смещению экструдера и неравномерности печати слоя, поэтому для проектируемого прототипа выбрана кинематика (см. рис. 3, б).

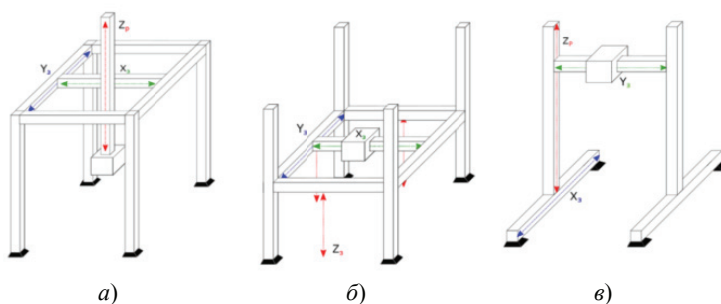


Рис. 3. Варианты кинематической схемы разрабатываемого 3D-принтера

Конструкция экструдера располагается в горизонтальной плоскости в отличие от аналогов с вертикальным расположением. Данная конфигурация имеет следующие преимущества: горизонтальная ориентация упрощает управление подачей строительных смесей через шнек, поскольку исключается влияние силы тяжести на дозирование, снижая риск заторов, тем самым уменьшая количество «подтеканий» строительного материала без использования дополнительной выходной заслонки на сопле; снижение нагрузки на подшипники и другие компоненты конструкции. Горизонтальное направление подачи материала обеспечит наибольшую точность, что приведет к более качественной печати. С эксплуатационной точки зрения такой экструдер легче обслуживать, так как основные компоненты находятся на уровне рабочей зоны, что упрощает замену или очистку деталей.

В разрабатываемой системе данный горизонтальный экструдер устанавливается на подвижную систему портального типа. Однако его конструкция имеет перспективы размещения на манипуляторах, аналогично устройству для 3D-печати строительными смесями на основе вяжущих материалов с помощью робота-манипулятора KUKA [17] для печати под различными углами.

После моделирования разработанного прототипа строительного 3D-принтера в программе Autodesk Inventor Professional 2020 проведен его анализ на деформации в соответствии с программой испытаний. Для этого заданы силы, воздействующие на элементы, и параметры их материалов, такие как модуль упругости и предел прочности. Например, предел прочности ABS пластика составляет от 40 до 65 МПа, алюминия – от 140 до 290 МПа, стали – от 600 до 900 МПа.

Рассмотрим найденные эквивалентные напряжения по Мизесу (предельное напряжение), контактные давления и смещения. Напряжение по Мизесу характеризует удельную потенциальную энергию формоизменения и часто рассматривается как критерий перехода материала в стадию пластического деформирования в случае многоосного напряженного состояния. Если значение эквивалентного напряжения по Мизесу превышает предельные значения, установленные для данного материала, ожидается разрушение конструкции.

Анализ экструдера

При анализе конструкции спроектированного шнекового экструдера найдены напряжения, испытываемые в точках конструкции. Максимальное значение (рис. 4) приходится на внутренний подшипник шагового двигателя. В остальных точках напряжение равномерно распределяется и стремится к нулю.

Максимальное абсолютное смещение увеличивается от места крепления экструдера к соплу и нагревательному элементу (рис. 5). Численные результаты представлены в табл. 2. Значение абсолютного смещения не является критичным и входит в предел погрешности. Значения максимальных напряжений относительно материалов также не несут существенной нагрузки.

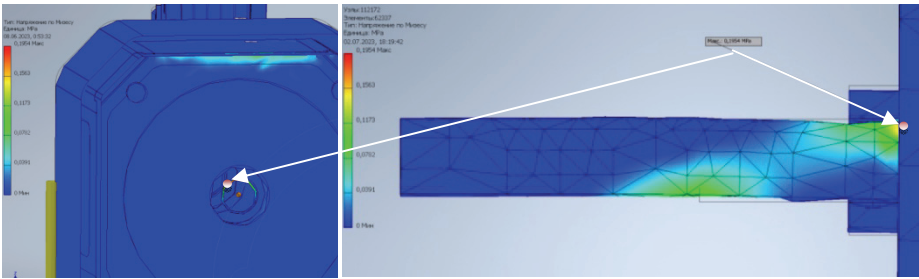


Рис. 4. Точка максимального напряжения экструдера на подшипнике

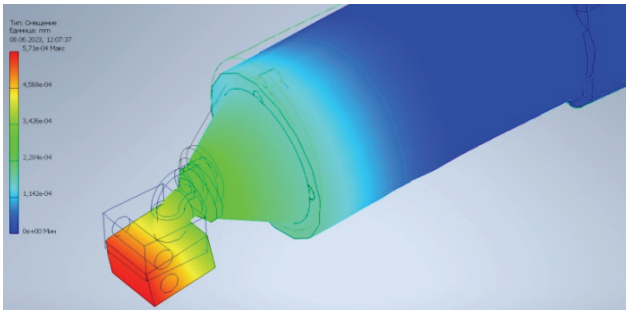


Рис. 5. Распределение абсолютного смещения

Таблица 2

Численные результаты анализа прототипа экструдера
в зависимости от материалов

Материалы		Максимальное абсолютное смещение, мм	Напряжение на валу шагового двигателя, МПа
Корпус экструдера	Шнек		
Пластик АБС	Пластик АБС	0,00105	0,04
	Алюминий 5005	0,000571	0,1963
Алюминий 6061 Т6	Алюминий 6061 Т6	0,00008115	0,07667
Сталь нержавеющая 440С сварочная	Алюминий 5005	0,00008354	0,09456
	Сталь нержавеющая 440С сварочная	0,0000829	0,1286

Анализ прототипа опытной (лабораторной) версии 3D-принтера

Данная версия имеет рабочую площадь в 1600 см² и высоту 40 см, диаметр винта 0,8 см. Исследуемый профиль: «конструкционный профиль V20×20». Максимальное напряжение на опоре оси X происходит, когда экструдер располагается на ее середине (рис. 6). В данном случае смещение вниз под действием силы тяжести будет максимальным (рис. 7).

Минимальный коэффициент запаса прочности располагается на винтах оси Z, в остальных точках он доходит до 15 (рис. 8). Численные значения абсолютного смещения экструдера от теоретической точки, максимальные напряжения ни оси X и на стальных винтах оси Z, значение минимального запаса прочности представлены в табл. 3.

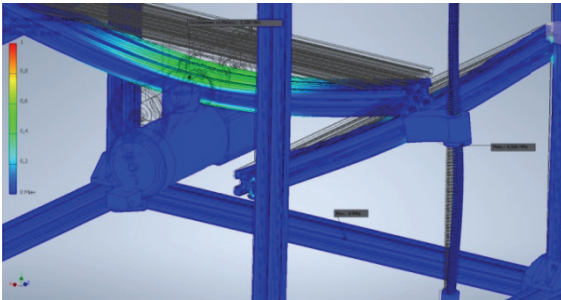


Рис. 6. Карта напряжений по Мизесу

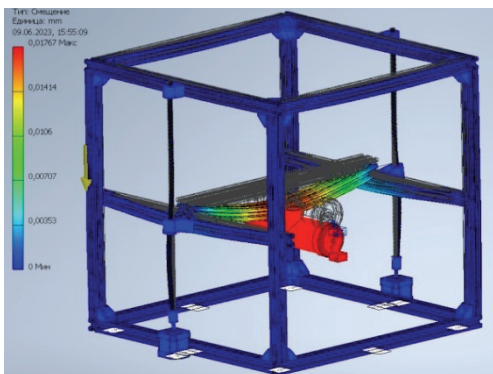


Рис. 7. Карта абсолютных смещений

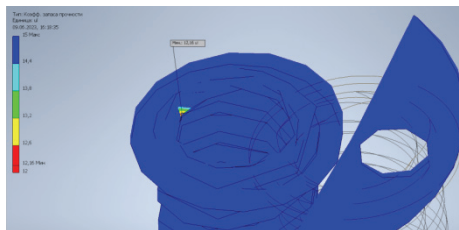


Рис. 8. Карта запаса прочности винтов

Таблица 3

**Численные результаты анализа прототипа опытной (лабораторной) версии
в зависимости от материалов**

Материалы		Максимальное напряжение на оси X, МПа	Максимальное смещение экструдера, мм	Максимальное напряжение на винте, МПа	Минимальный коэффициент запаса прочности винта
Экструдер	Каркас				
Пластик АБС	Алюминий 6061 T6	0,567	0,01631	7,799	13,26
1. Корпус: пластик АБС 2. Шнек: алюминий 5005		0,588	0,0173	8,506	12,16
Алюминий 6061 T6		0,58	0,01849	14,29	7,4
Сталь нержа- вующая 440С сварочная		0,96	0,03086	16,79	6,3
Алюминий 6061 T6	Сталь нержавеющая 440С сварочная	0,891	0,01022	7,222	Выше 15
Сталь нержа- вующая 440С сварочная		1,35	0,01624	10,83	

Анализ прототипа производственной версии

Отмасштабируем исходную конструкцию каркаса. Данная версия имеет рабочую площадь в $160\,000\text{ см}^2$ и высоту 400 см, диаметр винта 8 см. Максимальное напряжение на опоре оси X происходит, когда экструдер располагается на ее середине. В данном случае смещение вниз под действием силы тяжести будет максимальным (рис. 9). Численные значения абсолютного смещения экструдера от теоретической точки, максимальные напряжения на оси X и на стальных винтах оси Z, значение минимального запаса прочности представлены в табл. 4.

Получив результаты анализа модели на статические деформации, сравним полученные данные с физико-механическими свойствами материалов конструкции. Различные методики оценивают минимальный запас прочности стального резьбового элемента, зависящего от диаметра и испытываемых нагрузок, по-разному. Значения минимального запаса прочности, рассчитанные по методикам, меньше полученных экспериментально, что допустимо.

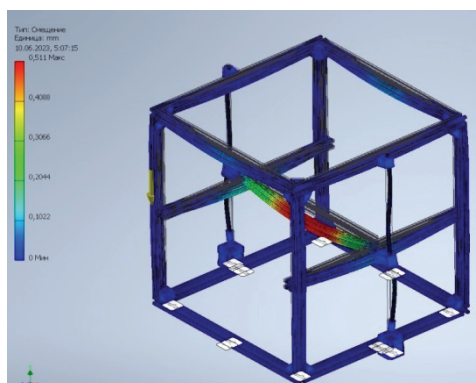


Рис. 9. Карта абсолютных смещений увеличенной модели

Таблица 4

**Численные результаты анализа прототипа производственной версии
в зависимости от материалов**

Материалы		Максимальное напряжение на оси X, МПа	Максимальное смещение экструдера, мм	Максимальное напряжение на винте, МПа	Минимальный коэффициент запаса прочности винта
Экструдер	Каркас				
Алюминий 6061 T6	Алюминий 6061 T6	1,401	0,4891	5,711	9,63
Сталь нержавеющая 440С сварочная		1,412	0,4896	5,709	9,63
Алюминий 6061 T6	Сталь нержавеющая 440С сварочная	4,02	0,467	17,13	Выше 15
Сталь нержавеющая 440С сварочная		4,03	0,4686	17,15	

Интерпретация результатов моделирования показывает, что реализация модели на практике позволит создать прочную и масштабируемую конструкцию строительного 3D-принтера. Алюминиевый каркас сохраняет приемлемые напряжения (1,4 МПа) при масштабировании, но смещение экструдера (~0,5 мм) может быть критичным для точности печати, однако для масштабов строительства незначительно. Стальной каркас снижает смещение на 4 %, но вызывает трехкратный рост напряжений на оси X и винтах, что недопустимо для крупногабаритных систем. Таким образом, масштабируемость конструкции нуждается в усовершенствовании. Конструкция несущих профилей может быть облегчена, но при этом дополнена ребрами жесткости и дополнительно может быть проработана их телескопичность.

Учитывая коэффициент теплового расширения алюминия, при нагреве экструдера возможны дополнительные смещения, компенсация которых также включена в систему позиционирования.

Оценим конструкцию с точки зрения значимости строительства в Арктической зоне. Ранее было сказано, что для печати необходимо обеспечить поддержание температуры. На формирующей головке экструдера размещаются нагреватель-

ный элемент и датчик температуры. При печати, перед попаданием на шнек, бетон предварительно нагревается в диапазоне 30...35 °С. В точке экструзии температура бетона должна составлять 60...85 °С [18] для укладываемости строительной смеси. Конструкция каркаса не только обеспечивает жесткость, но и позволяет создать в рабочей зоне термокамеру, в которой будет поддерживаться повышенная температура для ускорения набора прочности бетона. Исходя из кривых нагрева, по предварительным расчетам, при температуре выше 60 °С время набора 100 % прочности бетоном для одного готового одноэтажного объекта или элемента составляет от одного до двух дней.

Заключение

Разработанный прототип строительного 3D-принтера планируется применить как лабораторный стенд для обучения операторов устройства, а также для проведения испытаний по печати новыми разрабатываемыми строительными смесями, такими как, например, полимерно-песчаный композит. Исследование выявило критически важные элементы конструкции. Учет значений абсолютных отклонений от заданных значений координат в системе числового программного управления позволит повысить точность позиционирования. Для решения проблемы нагруженности винтов предлагается ввести дополнительную подсистему фиксаций на уровне текущего слоя.

Исследование выполнено в рамках инициативной НИОКР № 124041100082-5.

Список литературы

1. Кулёмин, В. В. Разработка универсального устройства управления производственными механизмами с беспроводной передачей данных / В. В. Кулёмин, В. В. Ерещенко // Наука и образование – 2021 : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Мурманск, 1 декабря 2021 г. – Мурманск, 2022. – С. 57 – 62.
2. Кулемин, В. В. Разработка структуры системы беспроводного числового программного управления строительным 3D-принтером / В. В. Кулемин, А. В. Кайченев, А. В. Столянов // Наука и инновации в Арктике : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Мурманск, 04 – 09 декабря 2023 г. – Мурманск, 2024. – С. 20 – 22.
3. MiniBuilders: Small Robots for Large Structures // Automate Construction. – 2020. – URL : <https://robots.iaac.net/> (дата обращения: 15.10.2023).
4. Computer Vision for Real-Time Extrusion Quality Monitoring and Control in Robotic Construction / A. Kazemian, X. Yuan, O. Davtalab, B. Khoshnevis // Automation in Construction. – 2019. – Vol. 101. – P. 92 – 98. doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.022
5. Khoshnevis, B. Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials / B. Khoshnevis, R. Dutton // Materials Technology. – 1998. – Vol. 13, No. 2. – P. 53 – 56. doi: 10.1080/10667857.1998.11752766
6. Zareian, B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete / B. Zareian, B. Khoshnevis // Automation in Construction. – 2017. – Vol. 83. – P. 212 – 221. doi: 10.1016/j.autcon.2017.08.019
7. Zareian, B. Effects of mixture ingredients on interlayer adhesion of concrete in Contour Crafting / B. Zareian, B. Khoshnevis // Rapid Prototyping Journal. – 2018. – Vol. 24, No. 2. – P. 584 – 592. doi: 10.1108/RPJ-02-2017-0029

8. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research / R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, J. Dirrenberger // *Cement and Concrete Research*. – 2018. – Vol. 112(C). – P. 37 – 49. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006
9. RVS-3D: Технологии 3D-печати в строительстве // RVS-3D. – URL : <https://rvs3d.ru/> (дата обращения: 15.10.2023).
10. ЛЕРТО: Роботизированные системы для строительства // ЛЕРТО. – URL : <https://lerto.ru/> (дата обращения: 15.10.2023).
11. Спецавиа: Профессиональные 3D принтеры для строительства и промышленности от «АМТ» // Спецавиа. – URL : <https://specavia.pro/> (дата обращения: 15.10.2023).
12. Apis Cor.: Construction with Robotics Precision // Apis Cor. – URL : <https://apis-cor.com/> (дата обращения: 15.10.2023).
13. StroyBot. 3D строительный принтер. Crowdfunding в России // 3Dtoday. – URL : <https://3dtoday.ru/blogs/andreyr/stroybot-3d-construction-of-the-printer-crowdfunding-in-russia> (дата обращения: 15.10.2023).
14. Балакин, А. И. Исследование воздействия нагрузок на деталь с использованием метода конечных элементов / А. И. Балакин, Н. А. Балакина // *Аллея науки*. – 2017. – Т. 2, № 16. – С. 810 – 815.
15. Копец, Е. Е. Математическое и программное обеспечение подсистемы эскизного проектирования САПР экструзионных 3D-принтеров : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / Копец Екатерина Евгеньевна. – Санкт-Петербург, 2022. – 188 с.
16. Копец, Е. Е. Математическое и программное обеспечение подсистемы эскизного проектирования САПР экструзионных 3D-принтеров : автореф. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / Е. Е. Копец. – Санкт-Петербург, 2022. – 20 с.
17. Патент № 209751, Российская Федерация, В29С 48/78 (2022.01). Устройство для 3D-печати на основе вяжущих : № 2021132749 : заявл. 10.11.2021 : опубл. 22.03.2022, бюл. № 9 / Тихонов А. А., Любимый Н. С., Польшин А. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова».
18. Р-НП СРО ССК-02-2015. Рекомендации по производству бетонных работ в зимний период. – Челябинск : Некоммерческое партнерство саморегулируемая организация «Союз строительных компаний Урала и Сибири», 2015. – 84 с.

Development of a Prototype Design for Construction of 3D Printer

V. V. Kulyomin✉, A. V. Kaychenov

*Department of Automation and Computer Engineering,
Murmansk State Technical University, cul3min@yandex.ru; Murmansk, Russia*

Keywords: automation of construction processes; arctic construction; deformation analysis; finite element method; low-temperature conditions; construction 3D printing; heat chamber; numerical control; screw extruder.

Abstract: The article focuses on the development and research of a prototype construction 3D printer adapted for Arctic regions of Russia. The study emphasizes the mechanical part of the printer, analyzed using Autodesk Inventor Professional 2020, including simulations of deformations, von Mises stresses, contact pressures, and displacements. Results demonstrate that the selected Cartesian kinematics and horizontal screw extruder ensure printing stability under loads, with a minimum safety factor of 7.4 for the aluminum frame. Special attention is given to solving low-

temperature concrete extrusion challenges, such as preheating the mixture to 60–85 °C and implementing a thermal chamber to accelerate strength development. The developed prototype could automate construction in the Far North, reducing housing construction time and manual labor.

References

1. Kulomin V.V., Yereshchenko V.V., *Nauka i obrazovaniye - 2021: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science and Education - 2021: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference], Murmansk, 01 December 2021, Murmansk, 2022, pp. 57-62. (In Russ.)
2. Kulemin V.V., Kaychenov A.V., Stolyanov A.V. *Nauka i innovatsii v Arktike: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [Science and Innovation in the Arctic: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation], Murmansk, 04-09 December 2023, Murmansk, 2024, pp. 20-22. (In Russ.)
3. MiniBuilders: Small Robots for Large Structures, *Automate Construction*, 2020, available at: <https://robots.iaac.net/> (accessed 15 October 2023).
4. Kazemian A., Yuan X., Davtalab O., Khoshnevis B. Computer Vision for Real-Time Extrusion Quality Monitoring and Control in Robotic Construction, *Automation in Construction*, 2019, vol. 101, pp. 92-98. doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.022
5. Khoshnevis B., Dutton R. Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials, *Materials Technology*, 1998, vol. 13, no. 2, pp. 53-56. doi: 10.1080/10667857.1998.11752766
6. Zareian B., Khoshnevis B. Effects of interlocking on interlayer adhesion and strength of structures in 3D printing of concrete, *Automation in Construction*, 2017, vol. 83, pp. 212-221. doi: 10.1016/j.autcon.2017.08.019
7. Zareian B., Khoshnevis B. Effects of mixture ingredients on interlayer adhesion of concrete in Contour Crafting, *Rapid Prototyping Journal*, 2018, vol. 24, no. 2, pp. 584-592. doi: 10.1108/RPJ-02-2017-0029
8. 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, vol. 112(C), pp. 37-49. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006
9. available at: <https://rvs3d.ru/> (accessed 15 October 2023).
10. available at: <https://lerto.ru/> (accessed 15 October 2023).
11. available at: <https://specavia.pro/> (accessed 15 October 2023).
12. available at: <https://apis-cor.com/> (accessed 15 October 2023).
13. available at: <https://3dtoday.ru/blogs/andreyr/stroybot-3d-construction-of-the-printer-crowdfunding-in-russia> (accessed 15 October 2023).
14. Balakin A.I., Balakina N.A. [Study of the impact of loads on a part using the finite element method], *Alleya nauki* [Alley of Science], 2017, vol. 2, no. 16, pp. 810-815. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Kopets Ye.Ye. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, St. Petersburg, 2022, 188 p. (In Russ.)
16. Kopets Ye.Ye. *Extended abstract of Candidate's of Engineering thesis*, St. Petersburg, 2022, 20 p. (In Russ.)
17. Tikhonov A.A., Lyubimyy N.S., Pol'shin A.A. *Ustroystvo dlya 3D-pechati na osnove vyazhushchikh* [Device for 3D printing based on binders], Russian Federation, 2022, Pat. 209751 (In Russ.)
18. R-NP SRO SSK-02-2015. *Rekomendatsii po proizvodstvu betonnykh rabot v zimniy period* [Recommendations for concrete work in winter], Chelyabinsk: Nekommercheskoye partnerstvo samoreguliruyemaya organizatsiya "Soyuz stroitel'nykh kompaniy Urala i Sibiri", 2015, 84 p. (In Russ.)

Entwicklung des Prototypentwurfs des Bau-3D-Druckers

Zusammenfassung: Es ist das Design des Prototyps eines 3D-Druckers, der für den Einsatz in den arktischen Regionen Russlands geeignet ist, entwickelt und untersucht. Der mechanische Teil des Druckers ist mit Autodesk Inventor Professional 2020 analysiert, einschließlich Modellierung von Verformungen, Hintergrundspannungen, Kontaktdrücken und Versätzen. Es ist gezeigt, dass die gewählte kartesische Kinematik und der horizontale Schneckenextruder die Druckstabilität unter Belastung mit einem minimalen Sicherheitsfaktor von 7,4 für den Aluminiumrahmen gewährleisten. Der Schwerpunkt liegt auf der Lösung von Problemen bei der Tieftemperaturextrusion von Beton, einschließlich der Vorwärmung der Mischung auf 60–85 °C, und der Schaffung einer Wärmekammer zur Beschleunigung des Festigkeitssatzes.

Développement de la conception du prototype de l'imprimante 3D

Résumé: Est élaborée et étudiée la conception d'un prototype de l'imprimante 3D adaptée aux régions arctiques de la Russie. Autodesk Inventor Professional 2020 a analysé la partie mécanique de l'imprimante, notamment en modélisant les déformations, les contraintes de von mises, les pressions de contact et les décalages. Est démontré que la cinématique cartésienne sélectionnée et l'extrudeuse à vis horizontale assurent la stabilité de l'impression sous charge, avec un facteur de sécurité minimal de 7,4 pour le cadre en aluminium. L'accent est mis sur la résolution des problèmes liés à l'extrusion à basse température du béton, y compris le préchauffage du mélange à 60–85 °C et la création d'une chambre thermique pour accélérer le gain de résistance.

Авторы: *Кулёмин Василий Викторович* – инженер-программист кафедры автоматики и вычислительной техники; *Кайченев Александр Вячеславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и вычислительной техники, ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», Мурманск, Россия.