

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.09

УДК 67.02

**И.И. Безукладников, С.А. Сторожев, Д.Н. Трушников,  
Е.А. Фокеев, А.А. Южаков**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Российская Федерация

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПРОЦЕССА НАПЛАВКИ В 3D-ПРИНТЕРАХ**

В современной промышленности технология трехмерной печати металлами играет ключевую роль, применяясь в широком спектре отраслей, однако ее эффективность часто подвергается испытанию из-за проблем качества и стабильности процесса. В данной статье представлено исследование указанных проблем с целью выявления основных факторов, влияющих на качество и стабильность трехмерной печати металлами, и поиска наиболее эффективных способов их решения. Объектом исследования является процесс трехмерной печати металлами. **Цель исследования:** выявление основных проблем, с которыми сталкивается процесс печати металлических деталей, и определение эффективных методов и решений для повышения качества, и стабильности процесса печати металлических деталей. **Методы:** в проведении данного исследования используются различные методы анализа, включая не только изучение конструкционных особенностей, но и программные аспекты процесса печати металлических деталей. Стоит отметить наличие экспериментальной установки. **Результаты:** проведенные исследования позволили выявить не только основные проблемы, но и определить факторы, которые влияют на качество и стабильность процесса печати металлами. Также предложены конкретные конструкционные и программные решения для преодоления основных проблем, что делает данное исследование значимым шагом в совершенствовании процессов трехмерной печати металлами и повышении их эффективности. **Значимость:** полученные результаты исследования являются важными для промышленности, поскольку способствуют разработке более надежных и точных систем трехмерной печати металлами. Это, в свою очередь, приводит к повышению эффективности производственных процессов и качества производимых изделий. Представленные результаты также могут послужить отправной точкой для дальнейших исследований в области совершенствования процессов трехмерной печати металлами и интеграции передовых технологий в производственные процессы.

**Ключевые слова:** 3D-печать, 3D-принтер, искусственный интеллект, металлическая печать, погонная энергия.

**I.I. Bezukladnikov , S.A. Storozhev, D.N. Trushnikov,  
E.A. Fokeev, A.A. Yuzhakov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **RESEARCH OF MODERN METHODS OF THE SURFACING PROCESS IN 3D PRINTERS**

In modern industry, the technology of three-dimensional metal printing plays a key role, being used in a wide range of industries, but its effectiveness is often tested due to problems of quality and stability of the process. This article presents a study of these problems in order to identify the main factors affecting the quality and stability of three-dimensional printing with metals, and to find the most effective ways to solve them. **Research goal:** the study is the process of three-dimensional printing with metals. The purpose of the study is to identify the main problems faced by the printing process of metal parts, and to identify effective methods and solutions to improve the quality and stability of the printing process of metal parts. **Methods:** various methods of analysis are used in this study, including not only the study of structural features, but also software aspects of the printing process of metal parts. It is worth noting the presence of an experimental installation. **Results:** the conducted research allowed us to identify not only the main problems, but also to identify factors that affect the quality and stability of the metal printing process. Specific design and software solutions are also proposed to overcome the main problems, which makes this study a significant step in improving the processes of three-dimensional printing with metals and increasing their efficiency. **Significance:** the obtained research results are important for the industry, as they contribute to the development of more reliable and accurate three-dimensional metal printing systems. This, in turn, leads to an increase in the efficiency of production processes and the quality of manufactured products. The presented results can also serve as a starting point for further research in the field of improving the processes of three-dimensional metal printing and integrating advanced technologies into production processes.

**Keywords:** 3D printing, 3D printer, artificial intelligence, metal printing, linear energy.

### **Введение**

Первые экземпляры 3D-принтеров появились примерно 40 лет назад. В то время они были дорогостоящими устройствами, характеризующимися медленной скоростью печати и ограниченными возможностями применения. Однако на сегодняшний день ситуация кардинально изменилась. Современные достижения в области 3D-печати позволяют изготавливать предметы различной сложности и размеров из широкого спектра материалов [1, 2]. 3D-печать, также известная как 3D-принтинг, или «аддитивное производство», представляет собой инновационный процесс, который позволяет создавать трехмерные объекты различной формы на основе цифровой модели [3, 4].

В последние годы аддитивное производство стало неотъемлемой частью обрабатывающей промышленности, особенно в контексте создания моделей и прототипов [4–7]. Это явление оказало значительное

воздействие на промышленность, привлекая все больше внимания к возможностям, которые предоставляет технология трехмерной печати методом послойного наплавления (FDM). Основная идея этой технологии заключается в создании объекта путем постепенного нанесения расплавленного материала на рабочую поверхность через нагреваемое сопло экструдера, формируя его слой за слоем [8–11].

В настоящее время 3D-принтеры обладают способностью работать с разнообразными материалами, включая металлы [12], силикон [13], бетон [14], керамику [15], стекло [16], дерево [17, 18], пищевые продукты [19] и живые клетки (в процессе биопечати) [20, 21]. Разнообразие доступных материалов предоставляет уникальные возможности для создания объектов с различными свойствами и функциональностью, начиная от прочных и долговечных до гибких и биосовместимых. Этот широкий спектр материалов делает современные 3D-принтеры неотъемлемым инструментом во многих областях, включая промышленность, медицину, архитектуру, дизайн и науку. Работа с разнообразными материалами открывает новые возможности для инноваций и креативного творчества, способствуя развитию современных технологий и применению 3D-печати в различных областях жизни [22].

Применение аддитивных технологий для производства металлических деталей различных изделий продолжает расширяться, постепенно вытесняя традиционные методы литья и сокращая необходимость фрезерования в процессе обработки. Этот процесс также приводит к значительному уменьшению объема отходов и времени, необходимого для обработки материала. В результате, использование аддитивных технологий становится более предпочтительным в промышленности благодаря своей способности оптимизировать производственные процессы и повысить эффективность производства. Этот тренд отражает важные изменения в производственном секторе, подтверждая, что аддитивное производство металлических деталей продолжает активно проникать в различные отрасли и становится неотъемлемой частью современной индустрии [23].

В настоящее время создание металлических изделий в основном осуществляется с помощью двух основных методов: литья и механической обработки. Также существуют комплексные методы, которые объединяют литье и механическую обработку. Однако эти методы имеют свои ограничения, такие как невозможность создания сложных

внутренних структур, значительный расход материала и другие трудности. В качестве альтернативы можно применять аддитивные технологии [24].

3D-печать металлами интегрируется в серийное производство. Определенные компоненты, изготовленные с использованием этой технологии, не только догоняют, но и превосходят свои аналоги, созданные по традиционным методам. Этот феномен является яркой демонстрацией потенциала и преимуществ 3D-печати металлами в промышленном производстве. Детали, произведенные с использованием передовых технологий, обладают уникальными свойствами и характеристиками, которые могут привести к улучшению производственных процессов и качества конечных продуктов [25]. Этот тренд подтверждает, что 3D-печать металлами становится неотъемлемой частью современной промышленности, изменяя подход к производству и открывая новые горизонты в области производства металлических деталей [26].

В отличие от традиционных методов производства, где до 90 % материалов может превратиться в отходы, 3D-печать металлами позволяет существенно снизить потребление ресурсов. Энергозатраты также сокращаются, а конечные изделия могут быть на 60 % легче, что имеет важное значение, особенно в отраслях, где каждый грамм играет решающую роль, таких как авиационная промышленность. Это не только сокращает расходы на топливо благодаря уменьшению веса конструкций, но и способствует повышению эффективности и экономической выгоде производственных процессов. Применение 3D-печати с металлами позволяет компаниям добиваться значительных экономических и экологических преимуществ за счет сокращения отходов и оптимизации использования производственных ресурсов [27, 28].

Существует определенная категория технологий, включающая в себя применение биопринтеров, которые предназначены для создания 3D-структур органов для трансплантации стволовыми клетками [20, 21, 28]. Эти устройства позволяют «напечатать» начальную структуру органа, после чего происходят развитие, рост и модификация клеток, в результате чего формируется окончательный орган. Новейшие разработки университета Миссури включают в себя метод, который позволяет наносить сгустки клеток заданного типа на специальный биогель. Этот процесс является важным шагом в развитии биопринтинга органов и может иметь ключевое значение в медицинской прак-

тике, предоставляя новые возможности для трансплантации органов и лечения различных заболеваний [28, 29].

Обычно трехмерные модели создаются с использованием программ для автоматизированного проектирования (САПР), которые обеспечивают управление процессом трехмерной печати. Для подготовки к печати модели часто сохраняют в формате файла STL. В настоящее время практически все принтеры оборудованы собственным программным обеспечением для управления процессом печати. Некоторые из этих программных решений доступны на коммерческой основе, тогда как другие основаны на платформах с открытым исходным кодом [30].

За последние несколько лет технология 3D-печати в области строительства и архитектуры быстро развивалась [31, 33]. От производства простых домов, напоминающих хижины, мы перешли к созданию оригинального и доступного жилья. В современной практике строительства 3D-принтеры используются для автоматизации процессов возведения зданий и других строительных операций. Эти устройства становятся неотъемлемой частью индустрии, предоставляя возможность реализации дерзких архитектурных проектов и экономически выгодных решений в области жилищного строительства. Они позволяют не только ускорить процесс строительства, но и значительно снизить затраты на ресурсы и трудозатраты. Технология 3D-печати в строительстве продолжает развиваться, открывая новые горизонты для креативности и инноваций в сфере архитектуры и дизайна зданий [34, 35].

Рассмотрим алгоритм работы 3D-принтера на примере процесса формирования металлических деталей.

### **Алгоритм работы 3D-принтера**

Для трехмерной печати применяется промышленный робот-манипулятор, где контроллер робота координирует работу отдельных приводов согласно требованиям перемещения инструмента. Этот метод обеспечивает точное и эффективное управление процессом печати.

Структурная схема существующей системы трехмерной печати металлами представлена на рис. 1.

Управление всей системой, включая чтение программы управления печатью и формирование задач для других устройств, осуществляется программируемым логическим контроллером (ПЛК). Этот контроллер играет важную роль в общем управлении, координируя дей-

ствия и обеспечивая согласованность работы всех компонентов системы. ПЛК отвечает за выполнение управляющей программы печати и передачу соответствующих команд другим устройствам, обеспечивая эффективную работу системы 3D-печати.

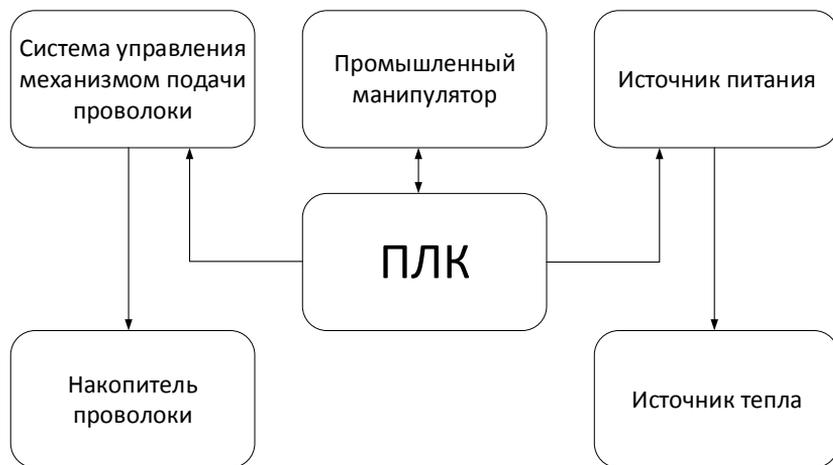


Рис. 1. Структурная схема существующей системы трехмерной печати металлами

ПЛК устанавливает связь с системой управления механизмом подачи проволоки, передавая необходимые команды для его функционирования. Эти команды направляются на регулирование работы механизма, который, в свою очередь, устанавливается на промышленном манипуляторе. Основная функция механизма подачи проволоки заключается в том, чтобы обеспечивать непрерывную подачу необходимого объема проволоки из накопителя с требуемой скоростью и ускорением, что достигается путем выполнения заданий, передаваемых от ПЛК.

ПЛК передает сигнал источнику питания для активации источника тепла. Принцип работы 3D-принтера описывается следующим образом: подающий двигатель перемещает проволоку, в то время как источник тепла формирует каплю, которая соединяется с изделием. После этого проволока отводится назад, что приводит к нанесению материала на изделие. Структура 3D-принтера представлена на диаграмме, изображенной на рис. 2.

Рассмотрим имеющиеся недостатки 3D-принтера. Из ряда характеристик, которые могут снизить качество изделия на 3D-принтерах, мы выделили те, которые считаем наиболее значимыми.

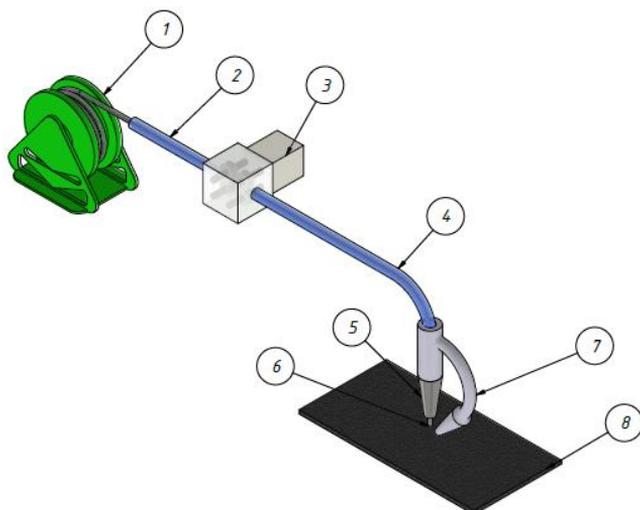


Рис. 2. Схема 3D-принтера: 1 – накопитель проволоки с выходом, 2 – изолирующий канал, 3 – подающий двигатель с роликами, 4 – продолжение изолирующего канала, 5 – наконечник(сопло), 6 – проволока, 7 – источник тепла, 8 – стол

### Деформация проволоки в изолирующем канале

Из-за большого расстояния между подающим двигателем 3 и соплом 3D-принтера 5 при подаче проволоки происходит ее деформирование в изолирующем канале, что проиллюстрировано на рис. 2, а. Изогнутая проволока вызывает задержку при оттягивании её назад двигателем, поскольку перед началом этого процесса она должна сначала выпрямиться (рис. 3). Это приводит к снижению частоты касания проволоки с поверхностью, которую наплавляют.

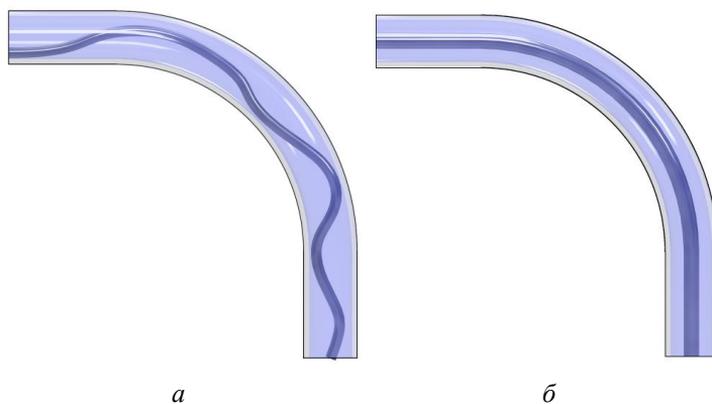


Рис. 3. Деформированная (а) и недеформированная (б) проволока в изолирующем канале

### **Изменение высоты слоя**

При использовании 3D-принтера для печати деталей возникает ряд дефектов, связанных с нестабильностью процесса наплавки. Эта неустойчивость обусловлена неровной поверхностью, на которую происходит наплавка. Данное явление вызвано неравномерным распределением тепловых и механических воздействий на расплавленный материал, что приводит к появлению неоднородностей и дефектов на окончательном наплавленном слое [36–38] (рис. 4, *а*).

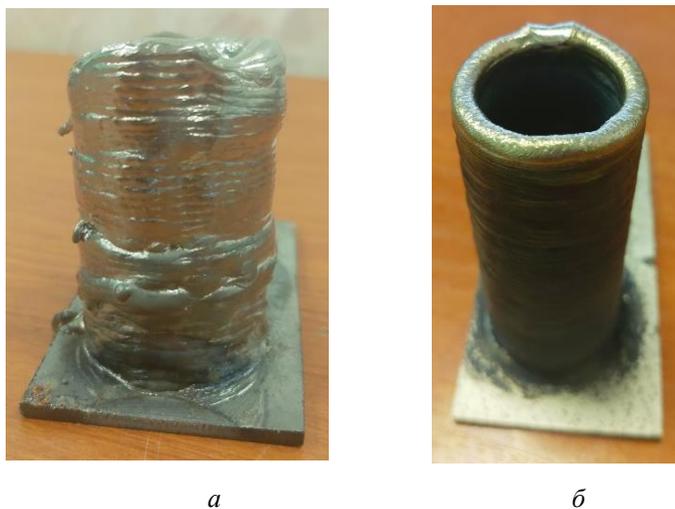


Рис. 4. Неоднородные (*а*) и однородные (*б*) слои

### **Изменение погонной энергии**

Погонная энергия является мерой теплового воздействия на сварное соединение и определяет количество тепловой энергии, передаваемой на определенную длину однопроходного шва. Она отражает уровень теплового воздействия, которое применяется к металлу в процессе сварки, и представляет важный параметр для контроля качества и эффективности сварочного процесса. Погонная энергия обычно рассчитывается как произведение тока сварочного аппарата на напряжение дуги и время сварки, применяемое на каждый миллиметр длины шва. Этот показатель позволяет оценить эффективность передачи тепла и оптимальное использование энергии в процессе формирования сварного соединения. Таким образом, контроль погонной энергии играет

важную роль в обеспечении соответствия сварочного процесса требованиям качества и безопасности, а также в достижении желаемых характеристик сварного шва [39].

Важным компонентом для успешной сварки является применение электродов с соответствующим покрытием. Это позволяет не только поддерживать стабильную дугу, но и обеспечивать эффективную передачу энергии на сварной шов. Использование правильного типа покрытия на электродах является ключевым аспектом процесса сварки, так как оно обеспечивает защиту металлической поверхности от окисления и других нежелательных воздействий. Кроме того, правильно выбранные электроды способствуют формированию качественного сварного шва с необходимыми механическими свойствами. Они обеспечивают оптимальное соотношение между стабильностью дуги и передачей энергии на место сварки, что в конечном итоге повышает эффективность и надежность процесса сварки [40].

Регулировка параметров температуры при изготовлении изделий предоставляет широкие возможности для формирования разнообразных структур материала. Этот процесс дает инженерам и исследователям возможность тщательно контролировать свойства материала в соответствии с поставленными требованиями и целями. Путем изменения температурных режимов в процессе производства можно достичь различных характеристик и структур материала, что позволяет создавать более качественные и инновационные изделия. Такой подход позволяет адаптировать материал к конкретным потребностям и условиям эксплуатации, обеспечивая оптимальные характеристики и эффективность продукции. В результате управления параметрами температуры инженеры могут достигать высокой степени точности и контроля над свойствами материала, что является ключевым фактором в разработке инновационных и качественных материалов [40, 41]. Регулировка температурных условий воздействия на материал играет значительную роль в формировании желаемой структуры и характеристик материала в процессе его обработки. Точное управление температурой является неотъемлемым компонентом для достижения оптимальных результатов при изготовлении изделий. При помощи контроля температуры возможно добиться необходимой текучести и формы материала,

обеспечивая его максимальную прочность, устойчивость и другие желаемые свойства. Этот процесс позволяет инженерам точно адаптировать материал к конкретным требованиям проекта и обеспечить высокую качественную производственную деятельность. Благодаря точному контролю температуры воздействия материала инженеры могут добиться максимальной эффективности процесса формирования, что в конечном итоге способствует повышению качества и конкурентоспособности готовой продукции [42–44].

Отмеченные недостатки могут быть классифицированы как конструкционные и программные, что открывает возможность их устранения различными методами. К примеру, конструкционное решение подразумевает решение проблемы скопления проволоки в изолирующем канале, в то время как программные подходы включают изменение высоты слоя и регулировку погонной энергии. Стоит обратить внимание на потенциал комбинированного применения обоих типов решений, что может дать наилучшие результаты в оптимизации работы системы. Для устранения данных недостатков предлагается использовать следующие методы решения, включая комбинацию конструкционных и программных подходов для максимальной эффективности и точности.

### **Решение проблемы скопления проволоки**

Один из способов предотвращения скопления проволоки в изолирующем канале заключается в использовании метода перемещения подающего двигателя с роликами ближе к накопителю проволоки и включении дополнительного компенсационного двигателя. Этот метод основан на идее перемещения проволоки вперед и назад около сопла при помощи дополнительного двигателя. Однако для его реализации необходимо обеспечить наличие дополнительного накопителя проволоки и координацию работы двух двигателей для обеспечения регулируемой подачи проволоки без риска перенапряжения. Такой подход позволяет предотвратить скопление проволоки в изолирующем канале и обеспечить более стабильную работу процесса печати. Однако внедрение этого метода требует тщательного планирования и инженерных усилий для обеспечения правильной синхронизации и координации работы всех компонентов системы.

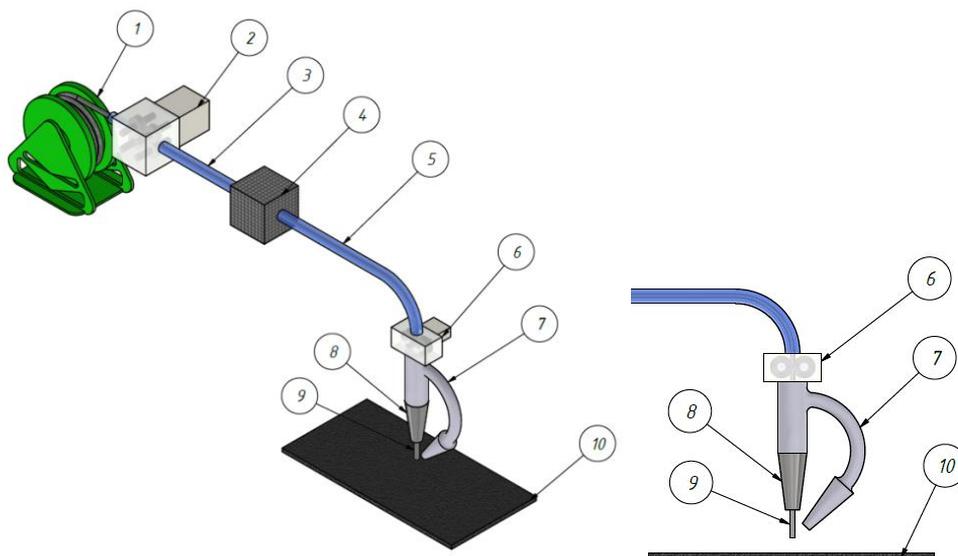


Рис. 5. Схема 3D-принтера: 1 – накопитель проволоки с выходом, 2 – подающий двигатель с роликами, 3 – изолирующий канал, 4 – дополнительный накопитель проволоки, 5 – продолжение изолирующего канала, 6 – компенсационный двигатель для подачи проволоки, 7 – источник тепла, 8 – наконечник (сопло), 9 – проволока, 10 – стол

Для эффективного управления процессом подачи проволоки требуется наличие датчика заполнения в дополнительном накопителе. Установка данного датчика позволит непрерывно контролировать уровень проволоки и принимать соответствующие меры: включать подающий двигатель для дозаправки проволоки, когда ее уровень становится ниже установленного порога, либо отключать подающий двигатель, чтобы избежать переполнения накопителя, когда его запас достигает предельного уровня. Эта автоматизация процесса гарантирует непрерывность его выполнения и повышает эффективность работы системы.

### Решение проблемы изменения высоты слоя

Рассмотрим метод изменения высоты наплавляемого слоя. В учебном пособии Ю.А. Вашукова [45] подробно описана зависимость формы и размера сварного шва от сварного тока, напряжения и скорости сварки. Применение искусственного интеллекта (ИИ) представляется эффективным способом решения проблемы неустойчивости в процессе наплавки. ИИ может автоматически оптимизировать параметры наплавки на основе данных о структуре поверхности. Это включает в себя ре-

гулирование температуры, скорости подачи материала и других факторов, чтобы минимизировать неравномерность воздействия на материал.

Предполагается создать систему управления процессом наплавки на основе искусственного интеллекта, способную выявлять возникающие дефекты, основываясь на данных о количестве подаваемой проволоки на каждый слой. Это позволит выявлять потенциальные проблемы и предпринимать меры по их предотвращению. Кроме того, необходимо установить камеры для точного определения места возникновения дефекта и его коррекции на последующих слоях. Таким образом, комбинируя оба подхода, мы можем получить качественное решение проблемы и более точно регулировать параметры процесса наплавки. Решение проблемы неустойчивости в процессе наплавки с применением ИИ представляет собой перспективное направление, обеспечивающее более точное, адаптивное и эффективное управление производственным процессом с учетом множества взаимосвязанных факторов.

### **Решение проблемы изменения погонной энергии**

Используем метод контроля погонной энергии. При увеличении силы тока увеличивается количество выделяющейся теплоты, что приводит к увеличению давления дуги на сварочную ванну. Этот процесс способствует увеличению глубины проплавления основного металла и его доли в формировании швов. Повышение давления дуги на поверхность сварочной ванны обуславливает оттеснение расплавленного металла из под дуги, что улучшает условия теплопередачи к основному металлу, а также увеличивает погонную энергию. Увеличение количества расплавляемого электродного металла ведет к росту высоты усиления шва. В то же время ширина шва немного возрастает, так как дуга проникает глубже в основной металл и находится ниже его плоскости [45].

Применение искусственного интеллекта для регулировки погонной энергии в производственном процессе требует установки датчиков температуры. Путем анализа данных о температуре и других параметров процесса искусственный интеллект способен оптимизировать параметры скорости передвижения и настраивать оптимальные условия для создания необходимых структур материала. Этот метод обеспечивает эффективное управление процессом путем интеллектуального анализа данных и автоматической коррекции параметров производства для достижения желаемых результатов.

Применение искусственного интеллекта для управления погонной энергией представляет собой перспективное направление в развитии производственных технологий. Эта стратегия может привести к значительному улучшению качества и эффективности производственных процессов. Внедрение искусственного интеллекта в регулировку погонной энергии может значительно оптимизировать работу системы, улучшив точность и стабильность производственных операций. Такие инновационные подходы способны повысить эффективность за счет оптимизации использования энергии и ресурсов. Кроме того, использование искусственного интеллекта может обеспечить более гибкое и адаптивное управление производственными процессами, что способствует сокращению времени настройки и улучшению общей производительности предприятия.

С учетом предложенных выше решений модифицированная структурная схема печати металлами представлена на рис. 6.



Рис. 6. Модифицированная структурная схема 3D-принтера для системы трехмерной печати металлами

### **Заключение**

В ходе проведенного анализа были выявлены основные трудности, возникающие при применении 3D-принтеров в металлообработке, и предложены эффективные стратегии для их преодоления. Внимание уделено как конструктивным, так и программным аспектам, воздей-

ствующим на качество и устойчивость процесса изготовления металлических деталей. Разработанные подходы, включая изменение дизайна системы подачи материала, интеграцию искусственного интеллекта для оптимизации параметров и регулировки энергии, представляют собой перспективные методы для повышения эффективности и точности в производственной сфере. Указанные методы не только призваны устранить выявленные проблемы, но и обеспечить более надежное и эффективное выполнение производственных операций. Эти инновационные стратегии могут существенно улучшить процессы металлообработки и способствовать повышению общей эффективности в производственной среде.

Основной акцент был сделан на исследовании инновационных стратегий по устранению выявленных недочетов и оптимизации производственных операций с применением передовых технологий. Полученные результаты представляют ценный вклад в индустрию, поскольку позволяют создавать более эффективные и конкурентоспособные системы трехмерной печати металлами. Это важный шаг в развитии отрасли и внедрении передовых методов в производственные процессы, что способствует росту производительности и улучшению качества производственных процессов. Полученные наработки могут повысить конкурентоспособность компаний и стимулировать инновационные изменения в сфере производства металлических деталей.

Дальнейшие научные изыскания в этой сфере помогут более глубоко проникнуть в суть проблем, с которыми сталкивается производственный процесс, и внести существенный вклад в разработку передовых методов и стратегий. Эти исследования будут способствовать дальнейшему совершенствованию производственных процессов и повышению качества финальной продукции. В результате будут созданы инновационные подходы, направленные на оптимизацию эффективности производства и обеспечение высокого уровня качества конечных изделий.

### **Библиографический список**

1. Неудахина, А.И. Роль технологий 3D печати в жизни человека / А.И. Неудахина, Е.М. Давыдова // Молодёжь и современные Информационные технологии: сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых; Томск, 12–14 ноября 2014 г. /

Нац. исслед. Томск. политехн. ун-т. Т. 2. – Томск: Изд-во Нац. исслед. Том. политехн. ун-та, 2014. – С. 181–182.

2. Определение соотношения температуры полимера на выходе сопла FFF/FDM 3D-принтера и длины активной (горячей) части для различных линейных скоростей печати / Е.В. Матвеев, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 70–78. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.08

3. Толкачев, С.А. Перспективы развития аддитивного производства в США / С.А. Толкачев, Е.И. Москвитина, Т.М. Цветкова // США и Канада: экономика, политика, культура. – 2016. – № 1 (553). – С. 87–102.

4. Toward autonomous additive manufacturing: Bayesian optimization 2021. – 46. – P. 566–575. DOI: 10.1557/s43577-021-00051-1

5. Передовые технологии аддитивного производства металлических изделий / А.А. Осколков, Е.В. Матвеев, И.И. Безукладников [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 90–105. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11

6. Fast dual rectangular axis-correlated kinematics fused deposition modeling (FDM) 3D printer / R. Abbas, G. Uzma, M. Nadeem [et al.] // Prog Addit Manuf. – 2024. – 9. – P. 331–339. DOI: 10.1007/s40964-023-00455-2

7. Symmetry-based decomposition for optimised parallelisation in 3D printing processes / H. Hatton, M. Khalid, U. Manzoor [et al.] // J. Adv. Manuf. Technol. – 2023. – 127. – P. 2935–2954. DOI: 10.1007/s00170-023-11205-7

8. Осколков, А.А. Применение вихретокового метода контроля в контуре управления температурой процесса трехмерной печати / А.А. Осколков, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 3. – С. 110–117. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-110-117

9. Осколков, А.А. Управление температурой в процессе трёхмерной печати на основе изменений электрических параметров нагреваемого сопла / А.А. Осколков, И.И. Безукладников, Д.Н. Трушников // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 16, № 5. – С. 19–25. DOI: 10.36622/VSTU.2020.16.5.003

10. Шилова, Ю.А. Индукционный нагрев сопла 3D принтера с FDM технологией / Ю.А. Шилова, И.И. Безукладников, Г.В. Бельский // *Материалы междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям.* – 2018. – Т. 1. – С. 622–626.

11. Shahrubudin, N. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications / N. Shahrubudin, T.C. Lee, R. Ramlan // *Procedia Manufacturing.* – 2019. – Vol. 35. – P. 1286–1296. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.089

12. Швецов, А.В. Промышленный переворот, или 3D-печать металлом / А.В. Швецов, В.А. Литвинова // *Материалы 65-й Юбилей. университет. науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых; Томск, 25 апреля 2019 г.* – Томск: Изд-во Томск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2019. – С. 486–489.

13. Разработка силиконовых форм, полученных с применением аддитивных технологий, для отливки ректальных суппозиторий / К.А. Гусев, О.А. Терентьева, Д.Н. Маймистов [и др.] // *Разработка и регистрация лекарственных средств.* – 2022. – Т. 11, № 4. – С. 116–124. DOI: 10.33380/2305-2066-2022-11-4-116-124

14. Удодов, С.А. 3D-печать в строительстве: новое направление в технологии бетона и сухих строительных смесей / С.А. Удодов, Ф.А. Белов, А.Е. Золотухина // *International Innovation Research: сб. ст. победителей VI Междунар. науч.-практ. конф.; Пенза, 27 января 2017 г.* / под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. – С. 58–61.

15. Береговой, В.А. 3D-принтер для печати строительной керамики / В.А. Береговой, И.Ю. Лавров // *Региональная архитектура и строительство.* – 2020. – № 1 (42). – С. 32–36.

16. Ожерельева, Н.В. Влияние дефлокулянта на реологические свойства смеси «натрий-кальций-силикатное стекло – вода» / Н.В. Ожерельева, А.В. Макаров // *Успехи в химии и химической технологии.* – 2021. – Т. 35, № 4 (239). – С. 73–75.

17. Пастух, О.А. Древесно-полимерный композит на основе PLA в предметном дизайне и дизайне среды / О.А. Пастух, А.Д. Карпова // *Ландшафтная архитектура, строительство и обработка древесины: материалы науч.-техн. конф. СПбГЛТУ по итогам НИР 2020 г. ИЛАСиОД; Санкт-Петербург, 01–31 января 2020 г.* – СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. гос. лесотехн. ун-та им. С.М. Кирова, 2021. – С. 351–356.

18. Лошкарева, М.П. Применение 3D-печати для строительства домов из древесно-композиционных материалов / М.П. Лошкарева, А.А. Шарапкин, В.Г. Новоселов // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: материалы XIX Всерос. (нац.) науч.-техн. конф. студ. и аспирантов; Екатеринбург, 03–13 апреля 2023 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. лесотехн. ун-та, 2023. – С. 433–440.

19. Мартеха, А.Н. Влияние технологических параметров 3D-печати на качество пищевых продуктов / А.Н. Мартеха, Ю.Е. Каверина // Стратегии и векторы развития АПК: сб. ст. по материалам нац. конф., посв. 100-лет. Кубан. ГАУ; Краснодар, 15 ноября 2021 г. / отв. за вып. А.А. Титученко. – Краснодар: Изд-во Кубан. гос. аграр. ун-та им. И.Т. Трубилина, 2021. – С. 314–319.

20. Калинина, А.А. 3D-биопринтинг: технологии печати жизнеспособных клеток / А.А. Калинина // Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности. Искусственный интеллект в создании картин: сб. тр. XVIII Междунар. конф. и XVI Междунар. конкурса науч. и науч.-метод. работ; Москва, 12–16 февраля 2021 г. / отв. ред. и сост. Т.В. Пирязева. – М.: Экон-Информ, 2021. – С. 142–144.

21. Формирование клеточных паттернов методом биопечати / А.А. Денисов, М.О. Досина, Ю.П. Токальчик [и др.] // Молекулярные, мембранные и клеточные основы функционирования биосистем: тез. докл. междунар. науч. конф., 14-го съезда Белорус. обществ. объедин. фотобиологов и биофизиков; Минск, 17–19 июня 2020 г. – Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 2020. – С. 79.

22. Dugelnaya, K.N. Application of additive technologies in the manufacture of women's clothing with finishing-decorative 3D elements / K.N. Dugelnaya, E.V. Lavris, E.V. Nikolaeva // Социально-гуманитарные проблемы образования и профессиональной самореализации (Социальный инженер-2021): материалы всерос. науч. конф. молодых исслед. с междунар. участ.; Москва, 06–10 декабря 2021 г. Vol. Ч. 7. – М.: Изд-во Рос. гос. ун-та им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2021. – Р. 47–49.

23. Шемонаева, Е.С. Оценка целесообразности применения аддитивных технологий в изделиях аэрокосмической техники / Е.С. Шемонаева, А.В. Гончаров, В.Д. Андреев // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 12 (120). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-12-2136

24. Сухоруков, С.И. Один из вариантов структуры роботизированного комплекса трехмерной печати металлических изделий / С.И. Сухоруков, А.Р. Овсянников // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. молод. ученых: в 2 ч.; Комсомольск-на-Амуре, 05–11 декабря 2022 г. / Ред.: С.И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Ч. 1. – Комсомольск-на-Амуре: Изд-во Комсомольский-на-Амуре гос. ун-та, 2023. – С. 95–98.

25. On the 3D printing of polyelectrolyte complexes: A novel approach to overcome rheology constraints / A.A. Jurago, R.A. Viers, A.T. Nguyen [et al.] // MRS Communications. – 2023. – 13. – P. 862–870. DOI: 10.1557/s43579-023-00415-5

26. Болдов, С.Е. 3D-печать металлических конструкций и изделий / С.Е. Болдов, А.А. Межорин, Н.Н. Карпушина // Новые технологии в учебном процессе и производстве: материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф.; Рязань, 17–19 апреля 2019 года / под ред. А.А. Платонова, А.А. Бакулиной. – Рязань: Рязаньпроект, 2019. – С. 195–197.

27. Исследование материала бронзовой втулки, полученной методом 3D-печати из металлополимерной проволоки / Р.А. Латышов, Е.В. Агеев, В.А. Стрижеус, К. Бугеррума // Известия Юго-Запад. гос. ун-та. Сер. Техника и технологии. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 8–20. DOI: 10.21869/2223-1528-2022-13-3-8-20

28. Additive manufacturing for fabrication of point-of-care therapies in austere environments // Mil Med. – 2023 Feb. 3 usad007. DOI: 10.1093/milmed/usad007. Epub ahead of print. PMID: 36734042

29. Коваленко, Р.В. Современные полимерные материалы и технологии 3D печати / Р.В. Коваленко // Вестник Технологич. ун-та. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 263–266.

30. Михайлов, Н.И. 3D-печать в строительстве / Н.И. Михайлов // Инженерные исследования. – 2021. – № 3 (3). – С. 28–35.

31. Parametric design and modular construction of a large additive-manufactured hyper shell structure / C. Su, M. Yuan, Y. Fan [et al.] // ARIN, 2023. – 2. – 21. DOI: 10.1007/s44223-023-00041-0

32. Привалов, А.С. Материалы, применяемые в качестве строительного сырья в 3D-печати / А.С. Привалов // Наука молодых – будущее России: сб. науч. ст. 4-й Междунар. науч. конф. перспективных разработок молод. ученых: в 8 т.; Курск, 10–11 декабря 2019 г. / отв.

ред. А.А. Горохов. Т. 7. – Курск: Изд-во Юго-Запад. гос. ун-та, 2019. – С. 367–370.

33. Колебакина, Н.В. Особенности создания культурного пространства с использованием современных цифровых технологий в архитектуре и строительстве / Н.В. Колебакина // Строительство и реконструкция: сб. науч. ст. 4-й Всерос. науч.-практ. конф. молод. ученых, аспирантов, магистров и бакалавров; Курск, 27 мая 2022 г. – Курск: Изд-во Юго-Запад. гос. ун-та, 2022. – С. 188–191.

34. Gamayunova, O. BIM-technology in architectural design / O. Gamayunova, N. Vatin // Advanced Materials Research. – 2015. – Vol. 1065–1069. – P. 2611–2614.

35. Симакова, Е.А. Применение 3D-печати в строительстве / Е.А. Симакова, К.И. Селякова, Д. Кравченко // Инженерные исследования. – 2021. – № 1 (1). – С. 3–11.

36. Технологическое обеспечение качества: Практикум / В.А. Макаров, О.Г. Драгина, М.И. Седых, П.С. Белов. – Егорьевск: Изд-во Егорьев. технолог. ин-та (филиал) Моск. гос. технолог. ун-та «СТАНКИН», 2015. – 102 с.

37. Белов, П.С. Анализ дефектов изделий, получаемых методами аддитивных технологий / П.С. Белов, С.Л. Махов // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – № 1 (91). – С. 8–13.

38. Мартиросов, Г.Г. Дефекты 3D печати методом FDM и методы их устранения / Г.Г. Мартиросов // Наука, технологии, образование: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. II Международ. науч.-практ. конф.; Пенза, 27 июня 2022 г. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. – С. 49–53.

39. Васильев, В.И. Введение в основы сварки: учеб. пособие / В.И. Васильев, Д.П. Ильященко, Н.В. Павлов; Юргинский технолог. институт. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2011. – 317 с.

40. Исследование различий погонной энергии ручной дуговой сварки, электродами с основным и рутил – целлюлозным покрытиями / Н.Н. Зиновьев, Н. Васильчук, Д.Ю. Казаков, И.Ю. Григоров // Проблемы и перспективы развития России: молодежный взгляд в будущее: сб. науч. ст. 6-й Всерос. науч. конф.: в 3 т.; Курск, 19–20 октября 2023 г. / ред.: А.А. Горохов (отв. ред.). – Курск: Университетская книга, 2023. – Т. 3. – С. 382–386.

41. Исследование влияния перьевой кристаллизации на свойства сварных швов алюминиевого сплава АМг6 / М.В. Шибалов, А.И. Ананьев, А.А. Курков, О.В. Бабичев // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2011. – № 5 (11). – С. 56–59.

42. Investigation of the stability of melting and electrode metal transfer in consumable electrode arc welding using power sources with different dynamic characteristics / Y.N. Saraev, D.A. Chinakhov, D.I. Piyashchenko [et al.] // *Welding International*. – 2017. – Vol. 31, no. 10. – P. 784–790. DOI: 10.1080/09507116.2017.1343977

43. Структура и свойства сварных соединений высокопрочных двухфазных титановых сплавов, выполненных ЭЛС и ТИГ / С.В. Ахонин, В.Ю. Белоус, Р.В. Селин [и др.] // *Автоматическая сварка*. – 2015. – № 8 (744). – С. 16–19.

44. Моделирование фазовых превращений при сварке легированных сталей / А.С. Куркин, Э.Л. Макаров, А.Б. Куркин [и др.] // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2016. – Т. 82, № 5. – С. 24–29.

45. Вашуков, Ю.А. Дуговая сварка в защитных средах: учеб. пособие / Ю.А. Вашуков. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2019.

## References

1. Neudakhina A.I., Davydova E.M. Rol' tekhnologii 3D pechati v zhizni cheloveka [The role of 3D printing technologies in human life]. *Molodezh' i sovremennye Informatsionnye tekhnologii. Sbornik trudov XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh; Tomsk, 12-14 November 2014. Tom. 2*. Tomsk: Natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, pp. 181-182.

2. Matveev E.V., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N. et al. Opredelenie sootnosheniia temperatury polimera na vykhode sopla FFF/FDM 3D-printera i dliny aktivnoi (goriachei) chasti dlia razlichnykh lineinykh skorostei pechati [Determination of the ratio of the polymer temperature at the outlet of the F/FDM nozzle of a 3D printer and the length of the active (hot) part for various linear printing speeds]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 70-78. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.1.08

3. Tolkachev S.A., Moskvitina E.I., Tsvetkova T.M. Perspektivy razvitiia additivnogo proizvodstva v SShA [Prospects for the development of additive manufacturing in the USA]. *SShA i Kanada: ekonomika, politika, kul'tura*, 2016, no. 1 (553), pp. 87-102.

4. Deneault J.R., Chang J., Myung J. et al. Toward autonomous additive manufacturing: Bayesian optimization on a 3D printer. *MRS Bulletin*, 2021, 46, pp. 566-575. DOI: 10.1557/s43577-021-00051-1

5. Oskolkov A.A., Matveev E.V., Bezukladnikov I.I. [et al.]. Peredovye tekhnologii additivnogo proizvodstva metallicheskih izdelii [Advanced technologies of additive manufacturing of metal products]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 90-105. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.3.11

6. Abbas R., Uzma G., Nadeem M. et al. Fast dual rectangular axis-correlated kinematics fused deposition modeling (FDM) 3D printer. *Prog Addit Manuf.*, 2024, 9, pp. 331-339. DOI: 10.1007/s40964-023-00455-2

7. Hatton H., Khalid M., Manzoor U. et al. Symmetry-based decomposition for optimised parallelisation in 3D printing processes. *J. Adv. Manuf. Technol.*, 2023, 127, pp. 2935-2954. DOI: 10.1007/s00170-023-11205-7

8. Oskolkov A.A., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N. Primenenie vikhretokovogo metoda kontrolya v konture upravleniia temperaturoi protsessa trekhmernoi pechati [Application of the eddy current control method in the temperature control circuit of the three-dimensional printing process]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 110-117. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-110-117

9. Oskolkov A.A., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N. Upravlenie temperaturoi v protsesse trekhmernoi pechati na osnove izmenenii elektricheskikh parametrov nagrevaemogo sopla [Temperature control in the process of three-dimensional printing based on changes in the electrical parameters of the heated nozzle]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, vol. 16, no. 5, pp. 19-25. DOI: 10.36622/VSTU.2020.16.5.003

10. Shilova Iu.A., Bezukladnikov I.I., Bel'skii G.V. Induktsionnyi nagrev sopla 3D printera s FDM tekhnologiei [Induction heating of the nozzle of a 3D printer with FDM technology]. *Materialy mezhdunarodnoi konferentsii po miagkim vychisleniiam i izmereniiam*, 2018, vol. 1, pp. 622-626.

11. Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications. *Procedia*

*Manufacturing*, 2019, vol. 35, pp. 1286-1296. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.089

12. Shvetsov A.V., Litvinova V.A. Promyshlenniy perevorot, ili 3D-pechat' metallom [Industrial revolution, or 3D metal printing]. *Materialy 65-i Iubileinoi universitetskoj nauchno-tehnicheskoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh, Tomsk, 25 April 2019*. Tomsk: Tomskii gosudarstvennyi arkhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2019, pp. 486-489.

13. Gusev K.A., Terent'eva O.A., Maimistov D.N. et al. Razrabotka silikonovykh form, poluchennykh s primeneniem additivnykh tekhnologii, dlia otlivki rektal'nykh suppozitoriev [Development of silicone molds obtained using additive technologies for casting rectal suppositories]. *Razrabotka i registratsiia lekarstvennykh sredstv*, 2022, vol. 11, no. 4, pp. 116-124. DOI: 10.33380/2305-2066-2022-11-4-116-124

14. Udodov S.A., Belov F.A., Zolotukhina A.E. 3D-pechat' v stroitel'stve: novoe napravlenie v tekhnologii betona i sukhikh stroitel'nykh smesei [3D printing in construction: a new direction in the technology of concrete and dry building mixes]. *International Innovation Research. Sbornik statei pobeditelei VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Penza, 27 January 2017*. Ed. G.Iu. Guliaev. Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Guliaev G.Iu.), 2017, pp. 58-61.

15. Beregovoi V.A., Lavrov I.Iu. 3D-printer dlia pechati stroitel'noi keramiki [3D printer for printing construction ceramics]. *Regional'naiya arkhitektura i stroitel'stvo*, 2020, no. 1 (42), pp. 32-36.

16. Ozherel'eva N.V., Makarov A.V. Vliianie deflokulianta na reologicheskie svoystva smesi "natrii-kal'tsii-silikatnoe steklo - voda" [The effect of deflocculant on the rheological properties of the mixture "sodium-calcium-silicate glass - water"]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2021, vol. 35, no. 4 (239), pp. 73-75.

17. Pastukh O.A., Karpova A.D. Drevesno-polimernyi kompozit na osnove PLA v predmetnom dizaine i dizaine sredy [PLA-based wood-polymer composite in object and environment design]. *Landshaftnaia arkhitektura, stroitel'stvo i obrabotka drevesiny. Materialy nauchno-tehnicheskoi konferentsii Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo lesotekhnicheskogo universiteta imeni S.M. Kirova po itogam NIR 2020 ILASiOD, Sankt-Peterburg, 01-31 January 2020*. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet imeni S.M. Kirova, 2021, pp. 351-356.

18. Loshkareva M.P., Sharapkin A.A., Novoselov V.G. Primenenie 3D-pechati dlia stroitel'stva domov iz drevesno-kompozitsionnykh materialov [The use of 3D printing for the construction of houses made of wood-composite materials]. *Nauchnoe tvorchestvo molodezhi - lesnomu kompleksu Rossii. Materialy XIX Vserossiiskoi (natsional'noi) nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov, Ekaterinburg, 03-13 April 2023*. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi lesotekhnicheskii universitet, 2023, pp. 433-440.

19. Martekha A.N., Kaverina Iu.E. Vliianie tekhnologicheskikh parametrov 3D-pechati na kachestvo pishchevykh produktov [The influence of the technological parameters of 3D printing on the quality of food products]. *Strategii i vektory razvitiia APK. Sbornik statei po materialam natsional'noi konferentsii, posviashchennoi 100-letiiu Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, Krasnodar, 15 November 2021*. Krasnodar: Kubanskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet imeni I.T. Trubilina, 2021, pp. 314-319.

20. Kalinina A.A. 3D-bioprinting: tekhnologii pečhati zhiznesposobnykh kletok [3D bioprinting: technologies for printing viable cells]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii v obrazovanii, nauke i promyshlennosti. Iskusstvennyi intellekt v sozdanii kartin. Sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoi konferentsii i XVI Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh i nauchno-metodicheskikh rabot; Moscow, 12-16 February 2021*. Ed. T.V. Piriazeva. Moscow: Ekon-Inform, 2021, pp. 142-144.

21. Denisov A.A., Dosina M.O., Tokal'chik Iu.P. et al. Formirovanie kletochnykh patternov metodom biopečhati [Formation of cellular patterns by bioprinting]. *Molekuliarnye, membrannye i kletochnye osnovy funktsionirovaniia biosistem. Tezisy dokladov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Chetyrnadsatogo s"ezda Belorusskogo obshchestvennogo ob"edineniia fotobiologov i biofizikov; Minsk, 17-19 iyunia 2020*. Minsk: Belorusskii gosudarstvennyi universitet, 2020, 79 p.

22. Dugelnaya K.N., Lavris E.V., Nikolaeva E.V. Application of additive technologies in the manufacture of women's clothing with finishing-decorative 3D elements. *Sotsial'no-gumanitarnye problemy obrazovaniia i professional'noi samorealizatsii (Sotsial'nyi inzhener-2021). Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh issledovatelei s mezhdunarodnym uchastiem; Moscow, 06-10 December 2021. Vol. 7*. Moscow: Rossiiskii

gosudarstvennyi universitet imeni A.N. Kosygina (Tekhnologii. Dizain. Iskustvo), 2021, pp. 47-49.

23. Shemonaeva E.S., Goncharov A.V., Andreev V.D. Otsenka tselesoobraznosti primeneniia additivnykh tekhnologii v izdeliakh aérokosmicheskoi tekhniki [Assessment of the feasibility of using additive technologies in aerospace products]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*, 2021, no. 12 (120). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-12-2136

24. Sukhorukov S.I., Ovsiannikov A.R. Odin iz variantov struktury robotizirovannogo kompleksa trekhmernoi pechati metallicheskih izdelii [One of the variants of the structure of a robotic complex for three-dimensional printing of metal products]. *Proizvodstvennye tekhnologii budushchego: ot sozdaniia k vnedreniiu. Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh: v 2 ch.; Komsomol'sk-na-Amure, 05-11 December 2022. Ed. S.I. Sukhorukov et al. Part 1. Komsomol'sk-na-Amure: Komsomol'skii-na-Amure gosudarstvennyi universitet, 2023, pp. 95-98.*

25. Jurago A.A., Viers R.A., Nguyen A.T. et al. On the 3D printing of polyelectrolyte complexes: A novel approach to overcome rheology constraints. *MRS Communications*, 2023, 13, pp. 862-870. DOI: 10.1557/s43579-023-00415-5

26. Boldov S.E., Mezhorin A.A., Karpushina N.N. 3D-pechat' metallicheskih konstruksii i izdelii [3D printing of metal structures and products]. *Novye tekhnologii v uchebnom protsesse i proizvodstve. Materialy XVII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii; Riazan', 17-19 April 2019. Ed. A.A. Platonov, A.A. Bakulina. Riazan': Riazan'proekt, 2019, pp. 195-197.*

27. Latypov R.A., Ageev E.V., Strizheus V.A., Bugerruma K. Issledovanie materiala bronzovoi vtulki, poluchennoi metodom 3D-pechati iz metallopolimernoi provoloki [Investigation of the material of a bronze sleeve obtained by 3D printing from metal polymer wire]. *Izvestiia Iugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 8-20. DOI: 10.21869/2223-1528-2022-13-3-8-20

28. Additive manufacturing for fabrication of point-of-care therapies in austere environments. *Mil Med.*, 2023 Feb 3:usad007. DOI: 10.1093/milmed/usad007. Epub ahead of print. PMID: 36734042

29. Kovalenko R.V. Sovremennye polimernye materialy i tekhnologii 3D pechati [Modern polymer materials and 3D printing technologies]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 263-266.

30. Mikhailov N.I. 3D-pechat' v stroitel'stve [3D printing in construction]. *Inzhenernye issledovaniia*, 2021, no. 3 (3), pp. 28-35.

31. Su C., Yuan M., Fan Y. et al. Parametric design and modular construction of a large additive-manufactured hyper shell structure. *ARIN*, 2023, 2, 21. DOI: 10.1007/s44223-023-00041-0

32. Privalov A.S. Materialy, primeniaemye v kachestve stroitel'nogo syr'ia v 3D-pechati [Materials used as building materials in 3D printing]. *Nauka molodykh - budushchee Rossii. Sbornik nauchnykh statei 4-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh; Kursk, 10-11 December 2019*. Ed. A.A. Gorokhov. Kursk: Iugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2019, vol. 7, pp. 367-370.

33. Kolebakina N.V. Osobennosti sozdaniia kul'turnogo prostranstva s ispol'zovaniem sovremennykh tsifrovyykh tekhnologii v arkhitekture i stroitel'stve [Features of creating a cultural space using modern digital technologies in architecture and construction]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiia. Sbornik nauchnykh statei 4-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, magistrrov i bakalavrov; Kursk, 27 May 2022*. Kursk: Iugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2022, pp. 188-191.

34. Gamayunova O., Vatin N. BIM-technology in architectural design. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1065-1069, pp. 2611-2614.

35. Simakova E.A., Seliakova K.I., Kravchenko D. Primenenie 3D-pechati v stroitel'stve [The use of 3D printing in construction]. *Inzhenernye issledovaniia*, 2021, no. 1 (1), pp. 3-11.

36. Makarov V.A., Dragina O.G., Sedykh M.I., Belov P.S. Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva: Praktikum [Technological quality assurance: The workshop]. Egor'evsk: Egor'evskii tekhnologicheskii institut (filial) Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta "STANKIN", 2015, 102 p.

37. Belov P.S., Makhov S.L. Analiz defektov izdelii, poluchaemykh metodami additivnykh tekhnologii [Analysis of defects in products obtained by methods of additive technologies]. *Nauka i biznes: puti razvitiia*, 2019, no. 1 (91), pp. 8-13.

38. Martirosov G.G. Defekty 3D pechati metodom FDM i metody ikh ustraneniia [Defects in 3D printing by FDM and methods of their elimina-

tion]. *Nauka, tekhnologii, obrazovanie: aktual'nye voprosy, dostizheniia i innovatsii. Sbornik statei II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii; Penza, 27 June 2022*. Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Guliaev G.Iu.), 2022, pp. 49-53.

39. Vasil'ev V.I., Il'iaschenko D.P., Pavlov N.V. *Vvedenie v osnovy svarki [Introduction to the basics of welding]*. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2011, 317 p.

40. Zinov'ev N.N., Vasil'chuk N., Kazakov D.Iu., Grigorov I.Iu. *Issledovanie razlichii pogonnoi energii ruchnoi dugovoi svarki, elektrodami s osnovnym i rutil - tselliuloznym pokrytiami [Investigation of differences in the linear energy of manual arc welding with electrodes with basic and rutile - cellulose coatings]*. *Problemy i perspektivy razvitiia Rossii: molodezhnyi vzgliad v budushchee. Sbornik nauchnykh statei 6-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii; Kursk, 19-20 October 2023*. Ed. A.A. Gorokhov. Kursk: Universitetskaia kniga, 2023, vol. 3, pp. 382-386.

41. Shibalov M.V., Anan'ev A.I., Kurkov A.A., Babichev O.V. *Issledovanie vliianiia per'evoi kristallizatsii na svoistva svarnykh shvov aluminievogo splava AMg6 [Investigation of the effect of feather crystallization on the properties of welds of aluminum alloy AMg6]*. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2011, no. 5 (11), pp. 56-59.

42. Saraev Y.N., Chinakhov D.A., Ilyashchenko D.I. et al. *Investigation of the stability of melting and electrode metal transfer in consumable electrode arc welding using power sources with different dynamic characteristics*. *Welding International*, 2017, vol. 31, no. 10, pp. 784-790. DOI: 10.1080/09507116.2017.1343977

43. Akhonin S.V., Belous V.Iu., Selin R.V. et al. *Struktura i svoistva svarnykh soedinenii vysokoprochnykh dvukhfaznykh titanovykh splavov, vypolnennykh ELS i TIG [Structure and properties of welded joints of high-strength two-phase titanium alloys made of ELS and TEAK]*. *Avtomaticheskaiia svarka*, 2015, no. 8 (744), pp. 16-19.

44. Kurkin A.S., Makarov E.L., Kurkin A.B. et al. *Modelirovanie fazovykh prevrashchenii pri svarke legirovannykh stalei [Modeling of phase transformations during welding of alloy steels]*. *Zavodskaiia laboratoriia. Diagnostika materialov*, 2016, vol. 82, no. 5, pp. 24-29.

45. Vashukov Iu.A. *Dugovaia svarka v zashchitnykh sredakh [Arc welding in protective environments]*. Samara: Samarskii universitet, 2019.

### **Сведения об авторах**

**Безукладников Игорь Игоревич** (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: corrector@at.pstu.ru).

**Сторожев Сергей Александрович** (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sastorozhev@pstu.ru).

**Трушников Дмитрий Николаевич** (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, доцент кафедры «Сварочное производство, метрология и технология материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: trdimitr@yandex.ru).

**Фокеев Егор Андреевич** (Пермь, Российская Федерация) – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: afokeev@mail.ru).

**Южаков Александр Анатольевич** (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: uz@at.pstu.ru).

### **About the authors**

**Igor I. Bezukladnikov** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: corrector@at.pstu.ru).

**Sergey A. Storozhev** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences of the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: sastorozhev@pstu.ru).

**Dmitriy N. Trushnikov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: trdimitr@yandex.ru).

**Egor A. Fokeev** (Perm, Russian Federation) – Graduate Student of the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: afokeev@mail.ru).

**Alexander A. Yuzhakov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: corrector@at.pstu.ru).

Поступила: 10.04.2024. Одобрена: 03.06.2024. Принята к публикации: 08.07.2024.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

**Вклад авторов.** Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Исследование современных методов процесса наплавки в 3D-принтерах / И.И. Безукладников, С.А. Сторожев, Д.Н. Трушников, Е.А. Фокеев, А.А. Южаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 167–194. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.09

Please cite this article in English as:

Bezukladnikov I.I., Storozhev S.A., Trushnikov D.N., Fokeev E.A., Yuzhakov A.A. Research of modern methods of the surfacing process in 3D printers. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 50, pp. 167-194. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.09