

Андреев Алексей Дмитриевич

студент

Научный руководитель

Миролюбова Наталия Алексеевна

старший преподаватель

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»

г. Москва

DOI 10.31483/r-167121

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ: СОВРЕМЕННЫЕ ИТ-РЕШЕНИЯ, СИНЕРГИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

***Аннотация:** в статье рассматривается трансформирующая роль и взаимосвязь искусственного интеллекта (ИИ) и аддитивного производства (АП) в современном промышленном ИТ-ландшафте. Обосновывается необходимость интеграции передовых алгоритмов машинного обучения, компьютерного зрения и генеративного ИИ в процессы 3D-печати для преодоления ограничений традиционного производства, повышения структурной целостности изделий и оптимизации использования ресурсов. Статья демонстрирует, что программно-аппаратный симбиоз ИИ и АП обеспечивает беспрецедентный уровень автоматизации и контроля качества. В заключении дается прогноз развития этих дисциплин, подчеркивающий их значимость для нового поколения ИТ-специалистов.*

***Ключевые слова:** системная инженерия, управление жизненным циклом, цифровые продукты, критическая информационная инфраструктура, ответственное программное обеспечение, итеративные методы, распараллеливание, импортозамещение, предикативное планирование.*

1. Введение.

В контексте Четвертой промышленной революции (Индустрия 4.0) стремительное развитие передовых производственных и информационных техноло-

гий фундаментально изменило подходы к проектированию и созданию физических объектов [1]. Среди этих технологий ключевым драйвером инноваций стало аддитивное производство (АП), широко известное как 3D-печать. Однако по мере роста сложности печатаемых деталей и ужесточения требований к их надежности, традиционные подходы к АП, основанные на ручной калибровке оборудования и методе проб и ошибок, перестают быть эффективными. Возникает острая необходимость в интеграции современных вычислительных технологий и алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) в производственную экосистему [2].

Аддитивное производство – это комплекс технологий, позволяющих создавать трехмерные объекты путем послойного добавления материала на основе цифровой CAD-модели, в отличие от субтрактивных методов (таких как фрезерование). АП включает в себя различные методы: селективное лазерное плавление (SLM), послойное наплавление полимеров (FDM) и стереолитографию (SLA). Главная цель АП заключается в изготовлении сложных геометрических форм, недоступных для традиционных станков. Тем не менее, аддитивные технологии сталкиваются со значительными трудностями: термическими деформациями, микроструктурными дефектами и низкой повторяемостью результатов [4].

Искусственный интеллект, в частности машинное обучение (ML) и глубокое обучение (DL), представляет собой ИТ-дисциплину, посвященную созданию систем, способных выявлять скрытые закономерности в огромных массивах данных и принимать решения с минимальным вмешательством человека. В отличие от классической программной инженерии, где алгоритмы прописываются жесткими правилами, модели ИИ способны адаптироваться. В промышленном контексте ИИ охватывает предиктивную аналитику, компьютерное зрение и генеративно-состязательные сети (GAN) [5].

Будучи интегрированным в производство, программный код ИИ выступает в роли «цифрового мозга» оборудования, смещая парадигму от реактивного исправления брака к проактивной оптимизации в реальном времени.

2. *Взаимосвязь ИИ и аддитивных технологий.*

Искусственный интеллект и аддитивное производство должны рассматриваться в неразрывной связке. Их синергия решает фундаментальные физические ограничения традиционного производства математическими и программными методами [6]. Основные точки их пересечения включают следующее.

1. *Интеллектуальное проектирование и генеративный дизайн.* Традиционные системы проектирования опираются на человеческий опыт. ИИ внедряет алгоритмический подход, при котором нейросети исследуют тысячи вариантов компоновки на основе заданных граничных условий (вектор нагрузок, ограничения по весу, свойства материала) [2]. АП – идеальный исполнитель для этого подхода, так как только 3D-печать способна создавать сложные бионические геометрии, сгенерированные машиной.

2. *Предиктивное планирование и слайсинг.* Перед началом печати необходимо определить оптимальную ориентацию детали в камере принтера и рассчитать поддерживающие структуры. Рекуррентные нейронные сети (RNN) и алгоритмы на базе деревьев решений анализируют исторические данные печати для выбора оптимальной стратегии, что снижает расход дорогостоящего порошка и минимизирует риск сбоя [7].

3. *Мониторинг in-situ (в реальном времени).* 3D-печать металлами связана с экстремальными температурными градиентами. Системы компьютерного зрения анализируют видеопотоки камеры принтера. Если сверточная нейросеть (CNN) замечает формирование поры или перегрев слоя, система за миллисекунды корректирует мощность лазера, замыкая контур автоматического управления.

4. *Ускоренный поиск материалов.* Разработка сплавов для 3D-печати ранее занимала годы. Сегодня алгоритмы машинного обучения анализируют базы данных химических свойств элементов, предсказывая термодинамическое поведение новых комбинаций материалов, что ускоряет НИОКР в десятки раз.

5. *Неразрушающий контроль качества.* После печати модели компьютерного зрения, обученные на снимках промышленной томографии, автоматически

выявляют внутренние микротрещины деталей, исключая человеческий фактор при контроле качества.

6. *Оптимизация логистики (IoT)*. ИИ прогнозирует износ деталей на предприятиях и отправляет команды на локальные 3D-принтеры для их оперативной печати, исключая необходимость длительного складского хранения [3].

3. *Примеры использования ИИ в аддитивном производстве.*

Для ИТ-специалистов наибольший интерес представляют конкретные архитектурные и программные реализации ИИ в промышленности. Рассмотрим ключевые технологические концепции.

3.1. *Генеративный дизайн в аэрокосмической отрасли.*

Аэрокосмическая промышленность – главный бенефициар генеративного дизайна [4]. В авиации снижение веса детали на несколько граммов дает колоссальную экономию топлива в масштабах срока эксплуатации лайнера. В облачные вычислительные кластеры загружаются жесткие ограничения: максимальные габариты, точки крепления и векторы физических нагрузок.

В отличие от классической топологической оптимизации, которая просто удаляет «лишнее» из готового чертежа, генеративный ИИ создает деталь с нуля. Алгоритмы эволюционного моделирования генерируют структуры, напоминающие костную ткань или пчелиные соты. После машинного отбора оптимальная 3D-модель отправляется на установку прямого лазерного спекания металлов (DMLS). Интеграция программного интеллекта и аддитивного оборудования позволяет снизить вес элементов (например, кронштейнов двигателей) на 30–40%, одновременно увеличив их прочностные характеристики [1].

3.2. *Обнаружение дефектов и анализ ванны расплава.*

При лазерной 3D-печати ключевую роль играет «ванна расплава» – микроскопическая зона, где лазер плавит металлический порошок. Любое отклонение температуры или скорости движения лазера ведет к браку [6].

Для контроля этого процесса применяются передовые достижения ИТ: высокоскоростные камеры промышленного зрения делают десятки тысяч снимков в секунду, формируя гигантский поток данных (Big Data). Алгоритмы на базе

архитектуры YOLO (You Only Look Once) или специализированные сверточные сети обрабатывают этот поток на лету (Edge Computing). Нейросеть классифицирует тепловые паттерны, отличая штатное плавление от дефектного. Обнаружив аномалию, микроконтроллер принтера, управляемый ИИ, мгновенно изменяет параметры лазера на текущем слое. Такой программный контроль гарантирует качество, необходимое для ракетных двигателей и медицинских имплантатов [9].

3.3. Цифровые двойники (*Digital Twins*) на базе ИИ.

Цифровой двойник – это сложная программная сущность, представляющая собой математически точную виртуальную копию физического 3D-принтера и детали [3]. Интеграция датчиков Интернета вещей (IoT) обеспечивает непрерывную двустороннюю связь между станком и сервером.

Перед физической печатью ИИ запускает миллионы симуляций в виртуальной среде цифрового двойника. Алгоритмы прогнозируют, как именно деталь деформируется при остывании. На основе этих вычислений ИИ вносит превентивные искажения в исходную CAD-модель – например, слегка изгибает ее в противоположную сторону [5]. В результате, когда физическая деталь остывает и сжимается, она принимает идеальную проектную форму. Этот программный подход экономит гигантские суммы, исключая потребность в тестовых физических распечатках.

3.4. ИИ в разработке новых сплавов.

Развитие 3D-печати тормозится узким спектром доступных порошковых металлов. Искусственный интеллект кардинально меняет процесс материаловедения. Графовые нейронные сети (GNN) используются для моделирования кристаллических решеток сплавов.

Программа анализирует огромные массивы данных о термодинамике и предсказывает, будет ли новый химический состав устойчив к лазерному плавлению. Принтер смешивает порошки по рецепту ИИ и печатает тестовый образец. Полученные физические характеристики вновь загружаются в нейросеть, дообучая модель. Эта замкнутая петля обратной связи между программным ал-

горитмом и аппаратной печатью сокращает сроки создания новых высокопрочных материалов с нескольких лет до пары месяцев [2].

4. Заключение.

Интеграция искусственного интеллекта и аддитивного производства представляет собой один из самых ярких примеров цифровой трансформации XXI века. Как показано в статье, внедрение ML-моделей превращает 3D-печать из слепого механического процесса в интеллектуальную, саморегулирующуюся экосистему [6].

Использование нейросетей в генеративном дизайне расширяет границы инженерной мысли, а алгоритмы компьютерного зрения обеспечивают контроль качества на микросекундном уровне, кардинально снижая уровень брака. Более того, концепции цифровых двойников и предиктивного моделирования материалов доказывают, что программный ИТ-уровень в современной промышленности стал не менее важен, чем аппаратные мощности заводов [3].

Для студентов ИТ-специальностей и будущих инженеров-программистов производственный сектор открывает уникальные перспективы. Разработка систем машинного обучения, способных в реальном времени управлять физической материей, требует глубоких знаний архитектуры ПО, аналитики данных и физики [5]. По мере того, как промышленность движется к полной автоматизации и устойчивому развитию, симбиоз программного кода и аддитивных станков будет только усиливаться, формируя фундамент высокотехнологичного производства будущего.

Список литературы

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2020. – 222 с.

2. Шарипов И.И. Применение искусственного интеллекта в аддитивных технологиях / И.И. Шарипов // Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Казань: КГЭУ, 2024. – С. 58–60.

3. Корнилов А.С. Цифровые двойники и искусственный интеллект в промышленности / А.С. Корнилов. – М.: Техносфера, 2021. – 312 с.
4. Gibson I. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker. – Springer Nature, 2021. – 698 p.
5. Machine learning in additive manufacturing: State-of-the-art and perspectives / C. Wang, X.P. Tan, S.B. Tor, C.S. Lim // Additive Manufacturing. – 2020. – Vol. 36. – P. 101538. DOI 10.1016/j.addma.2020.101538. EDN QXZZSM
6. Goh G.D. A review on machine learning in 3D printing: applications, potential, and challenges / G.D. Goh, S.L. Sing, W.Y. Yeong // Artificial Intelligence Review. – 2021. – Vol. 54. No. 1. – P. 63–94. DOI 10.1007/s10462-020-09876-9. EDN OVJXUC
7. Baturynska I. Towards Artificial Intelligence in Additive Manufacturing: A Review / I. Baturynska, K. Martinsen // Procedia CIRP. – 2021. – Vol. 104. – P. 381–386. DOI 10.1016/j.procir.2021.11.064. EDN VMYZHI