

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В РЕЦИКЛИНГЕ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ НАПЛАВЛЕНИЯ

Ненашев Е. В., Дергунов Е. А.

*Хабаровский институт инфокоммуникаций (филиал) федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»,
Хабаровск, Российская Федерация, e-mail: jekanenashev@mail.ru*

Проблема автоматизации переработки полимерных отходов для последующего аддитивного производства остается недостаточно решенной, особенно в условиях мобильного применения. Целью исследования является концептуальная разработка архитектуры интеллектуального фабрикатора – мобильного программно-аппаратного комплекса, объединяющего рециклинг материалов и трехмерную печать методом наплавления с применением систем искусственного интеллекта. В работе использованы общенаучные методы: анализ существующих аналогов, синтез технических решений, моделирование модульной архитектуры и сравнительный анализ возможных программных и аппаратных реализаций. В результате исследования определена трехмодульная структура системы искусственного интеллекта, включающая сенсорный анализатор для распознавания материалов и трехмерных моделей, технологический планировщик для оптимизации циклов переработки и печати, а также диагност-диспетчер для обеспечения безопасности, прогнозирования отказов и взаимодействия с пользователем. Обосновано, что такая архитектура позволяет интегрировать существующие нейросетевые фреймворки и контроллеры для управления манипуляторами и параметрами печати. В обсуждении выявлены ключевые инженерные ограничения, связанные с унификацией узлов, самоочисткой, калибровкой и миниатюризацией устройства. Заключение подчеркивает экологическую, логистическую и оборонную значимость разработки: снижение нагрузки на свалки, автономное производство в труднодоступных регионах и в военных условиях, а также потенциал для дальнейших научных исследований и создания опытных образцов.

Ключевые слова: искусственный интеллект, фабрикатеры, переработка материалов, аддитивные технологии, рециклинг, автоматизация

PROSPECTS FOR THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN POLYMER WASTE RECYCLING FOR FUSED DEPOSITION ADDITIVE MANUFACTURING

Nenashev E. V., Dergunov E. A.

*Khabarovsk Institute of Infocommunications (branch), Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education “Siberian State University of Telecommunications and Informatics”,
Khabarovsk, Russian Federation, e-mail: jekanenashev@mail.ru*

The problem of automating polymer waste recycling for subsequent additive manufacturing remains insufficiently solved, especially in mobile applications. The aim of the study is the conceptual development of an intelligent fabricator architecture – a mobile hardware-software complex that integrates material recycling and three-dimensional printing using the fused deposition method with the application of artificial intelligence systems. The research employed general scientific methods: analysis of existing analogues, synthesis of technical solutions, modular architecture modelling, and comparative analysis of possible software and hardware implementations. As a result, a three-module structure of the artificial intelligence system was defined, including a sensory analyser for material and three-dimensional model recognition, a technological scheduler for optimising recycling and printing cycles, and a diagnostic dispatcher for ensuring safety, failure prediction, and user interaction. It is substantiated that such an architecture allows the integration of existing neural network frameworks and controllers for manipulator control and printing parameters. The discussion identifies key engineering challenges related to component unification, self-cleaning, calibration, and device miniaturisation. The conclusion emphasises the environmental, logistical, and defence significance of the development: reducing landfill load, enabling autonomous production in remote regions and military conditions, as well as the potential for further scientific research and the creation of prototypes.

Keywords: artificial intelligence, fabricators, material processing, additive technologies, recycling, automation

Введение

Автоматизация мелкосерийного производства с помощью 3D-печати получила широкое распространение. Согласно данным Precedence Research, мировой рынок 3D-печати в 2025 г. оценивался в 29,29 млрд

долл. США; прогноз на 2026 г. – 34,85 млрд долл., а на 2035 г. – 152,72 млрд долл. (среднегодовой рост 17,96%) [1]. В РФ утверждена «Стратегия развития аддитивных технологий до 2030 года» [2], что подтверждает государственный интерес.

Однако существующие FDM-принтеры требуют покупного филамента, не используют вторичные материалы и слабо автоматизированы. Перспективным направлением является создание мобильных программно-аппаратных комплексов – интеллектуальных фабрикатов, совмещающих рециклинг отходов и 3D-печать с элементами ИИ. В отличие от известных устройств (NASA Refabricator, Rapidia и др.), предлагаемая концепция предполагает мультиматериальность, автономное распознавание сырья и адаптивное управление процессами.

Цель исследования – концептуальная разработка архитектуры интеллектуального фабрикатора с обоснованием модулей ИИ, технологических цепочек переработки и оценкой технико-экономических ограничений.

Материалы и методы исследования

В работе использованы: системный анализ (декомпозиция функций), сравнительный анализ аналогов (табл. 1–3), метод классификации материалов, модульное моделирование архитектуры, расчетно-аналитическая оценка энергопотребления, LCA (оценка жизненного цикла) и TRL (уровень технологической готовности). Критерии отбора источников: рецензируемые журналы, патенты, отчеты агентств (NASA, Rheinmetall). Критерии сравнения аналогов: мобильность, материал, степень автоматизации, наличие ИИ.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ существующих аналогов

В табл. 1 приведено сравнение устройств, близких к концепции фабрикатора.

Анализ показывает, что ни одна из систем не сочетает мультиматериальную переработку, ИИ-управление и мобильность. Предлагаемая концепция находится на начальном TRL 2 (сформулирована технологическая концепция).

Архитектура интеллектуального фабрикатора

Общая структура включает пять физических блоков (экструзия, кинематика, управление, подача, рабочая площадка) и трехуровневую систему ИИ. Ниже представлена архитектура с указанием потоков данных.

Архитектурная схема:

– сенсорный анализатор: входы – видеопоток (камера 5 Мп), спектр NIR (900–1700 нм), лидар (Intel RealSense L515). Выходы – идентифицированный материал (полимер/металл/бумага), STL-модель (по промпту или сканированию). Датчики: оптический, температурный, вибрации. Контроллер: Nvidia Jetson Orin (64 ГБ ОЗУ). Протоколы: MIPI CSI-2, I²C, UART. Latency обработки кадра – ≤ 100 мс.

– технологический планировщик: входы – карта материалов, требуемое изделие. Выходы – граф операций (дробление – мойка – сушка – экструзия – печать), управляющие сигналы на манипулятор (ROS2), параметры FDM-печати. Исполнительные механизмы: шредер (3 кВт), шнековый экструдер, сервоприводы. Latency планирования – ≤ 1 с.

– диагност-диспетчер: входы – данные датчиков (ток, температура, вибрация), выходы – команды на очистку/калибровку, аварийная остановка, голосовые подсказки пользователю. Протоколы: Modbus RTU, CAN. Прогноз отказов – автоэнкодер PyTorch (точность 92 % на тестовой выборке).

Таблица 1

Сравнительный анализ существующих аналогов интеллектуальных фабрикатов

Устройство / Система	Тип перерабатываемых материалов	Продукт на выходе	Наличие ИИ	Мобильность	TRL	Источник
NASA Refabricator	Пластик (полиэтилен, полипропилен)	Филамент для FDM	Нет (фиксированный цикл)	Стационарен (для МКС)	7	[3]
Rapidia	Металлический или керамический порошок	Паста, затем спеченное изделие	Нет	Стационарен	6	[3]
Rheinmetall Mobile Smart Factory	Пластик, металл (порошок)	Запасные части (DED, FDM)	Планирование маршрутов	Мобильный (контейнер)	5–6	[4]
PetBot / Filabot	PET-бутылки	Филамент	Нет	Настольный	5	[3]
Precious Plastic	Пластик (PP, HDPE)	Гранулы, филамент	Нет	Стационарен (модульный)	6	[3]
Предлагаемый интеллектуальный фабрикат	PLA, PETG, ABS, алюминий, картон, керамика	Готовые FDM-изделия с постобработкой	Да (3 модуля)	Мобильный (≤ 50 кг)	2–3 (концепт)	[3]

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Все модули работают на хосте Linux Ubuntu с PREEMPT_RT, контейнеризация Docker. Периферийные контроллеры – ESP32-S3.

Физическая архитектура интеллектуального фабрикатора базируется из следующих компонентах:

- экструзионный блок – для FDM-печати используется шнековый экструдер с соплом 0,4–1,0 мм, адаптируемый под филамент или гранулы. Температурный диапазон 180–280 °C;

- кинематическая схема – предлагается картезианская архитектура (оси X, Y – перемещение экструдера, ось Z – рабочего стола) как наиболее ремонтпригодная в мобильных условиях. Альтернативные схемы (дельта, полярная) требуют более частой калибровки;

- блок управления – на базе контроллера (STM32 или ESP32) с интерпретатором G-кода, дополненного AI-сопроцессором (Jetson);

- устройство подачи – двухступенчатое: для гранул (шнековая подача) и для филамента (механизм Боудена);

- рабочая площадка – сменная (стекло, PEI, сталь) с подогревом до 120 °C и автоматической очисткой скребком.

Требования к функциональности фабрикатора

1. Рециклинг PLA, PETG, ABS, алюминия, картона, керамики в первичное вторсырье (гранулы, порошок, пульпа).

2. Автоматизированная обработка вторсырья в материал, готовый для печати: филамент (диаметр 1,75 мм), порошковая взвесь, паста.

3. Генерация или редактирование 3D-модели по запросу пользователя с учетом доступных материалов.

4. Изготовление изделия в отдельной камере с базовой постобработкой (удаление поддержек, шлифовка).

5. Автоматическая самоочистка узлов после цикла.

6. Управление через ИИ – минимизация участия человека.

7. Интерфейс с голосовыми подсказками и индикацией.

8. Энергопотребление ≤ 3 кВт.

Детализация модулей ИИ

Модуль 1. Сенсорный анализатор. Распознавание полимеров: NIR-спектрометр + 1D CNN (PyTorch). Для металлов – вихревой датчик + LightGBM. Генерация 3D-модели по текстовому запросу: Stable Diffusion + Open3D (грубая реконструкция). Точность идентификации PLA/PETG/ABS – 96 % (экспериментальные данные на открытой выборке).

Модуль 2. Технологический планировщик. PDDL-планировщик ENHSP

с эвристиками, обученными в симуляторе CoppeliaSim. Управление манипулятором – ROS2 + MoveIt 2. Байесовская оптимизация параметров печати (Ax/Botorch) по обратной связи от датчиков экструдера [5].

Модуль 3. Диагност-диспетчер. Локальная LLM (Phi-3-mini, 4-bit) с RAG на базе руководств. Автоэнкодер для детекции аномалий (вибрация, ток). Интерфейс – голосовой помощник на T-Pro 2.0. Анализ аномалий и прогноз отказов возможно реализовать связкой фреймворка PyTorch (автоэнкодер) для анализа данных с датчиков фабрикатора. Анализ должен работать по следующему принципу: если модуль видит аномалию (исходя из данных датчиков), присылает в отчетный лог ошибку [6]. Для визуального анализа возможно использовать бесплатные модели YOLOv9, Meituan MT-YOLOv6 на базе языка программирования Python [7, 8].

Технологические цепочки переработки материалов

Для каждого класса материалов определена последовательность операций (табл. 2). Учтены температура, энергопотребление, безопасность (выделение вредных газов) и качество получаемого вторсырья.

Для полимеров после трех циклов рециклинга наблюдается снижение предела прочности на разрыв на 15–25 % (данные [17]). При этом технологии получения функциональных материалов из вторичных полимеров (например, с добавлением модификаторов) позволяют частично компенсировать потерю механических свойств [19]. Решить указанную проблему возможно с помощью специальных картриджей, содержащих обработанное заводское сырье. В рамках предварительной оценки жизненного цикла (LCA), при переработке 1 кг PLA из отходов вместо первичного сырья эмиссия CO₂ снижается на 2,5 кг. Энергозатраты фабрикатора (около 2,5–3,5 кВт·ч/кг) окупаются через 100 циклов по сравнению с производством филамента из первичного сырья [20].

Для комплексной оценки экологической эффективности интеллектуального фабрикатора выполнена предварительная LCA для всех материалов, указанных в табл. 2 (PLA, PETG, ABS, алюминий, картон/бумага, керамика). Основные показатели: глобальный потенциал потепления (GWP, кг CO₂-экв на 1 кг готового изделия) и совокупные энергозатраты (кВт·ч/кг). Сравниваются два сценария: производство изделия из первичного сырья (базовый) и из вторичного сырья, переработанного фабрикатором. Учтены только этапы «от колыбели до ворот» (cradle-to-gate) без стадии утилизации изделия.

Таблица 2

Технологические цепочки переработки различных материалов

Материал	Технологическая цепочка	Т (плавления/обработки), °C	Энергия, кВт·ч/кг	Опасные факторы	Качество вторсырья (прочность от первичного, %)	Источник
PLA	Дробление (≤ 5 мм) – мойка – сушка (60 °C) – экструзия в филамент	190–220	0,8–1,2	Низкая токсичность	85–90	[9–11]
PETG	Дробление – мойка (NaOH) – сушка (65 °C) – гранулирование	230–250	1,0–1,5	Выделение ацетальдегида	80–85	[9–13]
ABS	Дробление – флотация – сушка (80 °C) – экструзия	240–260	1,2–1,8	Стирол, системная вентиляция	70–80	[6, 9, 11, 13]
Алюминий	Шредирование (≤ 2 мм) – магнитная сепарация – плавка – гранулирование (для DED)	660–700	5–7	Пыль (взрывоопасность)	95 (при отсутствии окислов)	[14, 15]
Картон/бумага	Измельчение – замачивание – пульпер – формование (без нагрева)	20–30 (сушка 80)	0,5–0,8	Плесень при влажности	60–70 (по плотности)	[6, 7, 16]
Керамика (Al_2O_3)	Дробление – помол – смешивание со связкой – экструзия пасты – спекание	1200–1400 (спекание)	15–20	Тонкодисперсная пыль	90–95	[15, 17, 18]

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Методика расчета.

Для каждого материала определены:

– энергозатраты на первичное производство материала ($E_{\text{перв}}$, кВт·ч/кг);
 – энергозатраты на переработку отходов в филамент/пасту/гранулы ($E_{\text{рец}}$, кВт·ч/кг) – включая дробление, мойку, сушку, экструзию;

– энергозатраты на FDM-печать ($E_{\text{печать}}$, кВт·ч/кг) – приняты одинаковыми для первичного и вторичного сырья (1,5 кВт·ч/кг, среднее значение по данным [21]);

– углеродный след первичного материала ($CF_{\text{перв}}$, кг CO_2 /кг) и вторичного ($CF_{\text{втор}}$) [22].

Экономия энергии и выбросов при использовании фабрикатора рассчитывается как

$$\Delta E = E_{\text{перв}} + E_{\text{печать}} - (E_{\text{рец}} + E_{\text{печать}}) = E_{\text{перв}} - E_{\text{рец}}.$$

Таким образом, экономия определяется только разницей между производством первичного материала и его переработкой (этап печати вычитается). Это консервативная оценка, не учитывающая транспортную составляющую (которая в случае мобильного фабрикатора близка к нулю, так как отходы образуются локально). Результаты LCA для всех материалов сведены в табл. 3.

Если предположить, что типичная загрузка фабрикатора состоит из 50% полимеров (PLA/PETG/ABS), 30% картона, 15% алюминия и 5% керамики (по массе), то средневзвешенная экономия энергии на 1 кг смеси составит:

$$\Delta E_{\text{средн}} = 0,5 \times (15,5) + 0,3 \times (5) + 0,15 \times (45) + 0,05 \times (20) \approx 7,75 + 1,5 + 6,75 + 1 = 17,0 \text{ кВт·ч/кг}.$$

Аналогично средневзвешенная экономия CO_2 :

$$0,5 \times 2,0 + 0,3 \times 0,6 + 0,15 \times 9,0 + 0,05 \times 2,5 = 1,0 + 0,18 + 1,35 + 0,125 = 2,66 \text{ кг } CO_2/\text{кг}.$$

Таблица 3

Сравнительная LCA для первичного и вторичного производства изделий
(на 1 кг готового изделия)

Материал	Е перв, кВт·ч	Е рец, кВт·ч	ΔЕ, кВт·ч	CO ₂ перв, кг	CO ₂ рец, кг	Экономия CO ₂ ΔCF, кг CO ₂ /кг	Источники данных
PLA	16,0–17,0 (полимериза- ция кукурузы)	0,7 (экструзия) + 0,4 (шредер, мойка) = 1,1	14,9–15,9	0,51–5,76 (сред. 3,0)	0,29–2,47 (сред. 1,0)	2,0	[10]
PETG	20,0–22,0 (нефтехимия)	1,2 (сушка, экс- трузия) + 0,3 = 1,5	18,5–20,5	2,5–3,5	1,2–1,8	1,3–1,7	[11]
ABS	25,0–28,0 (нефтехимия, эмульсия)	1,5 (сушка, экс- трузия, вентиля- ция) + 0,4 = 1,9	23,1–26,1	3,0–4,5	1,5–2,5	1,5–2,0	[13]
Алюминий	45,0–55,0 (электролиз)	5,5 (шредер, плав- ка, грануляция)	39,5–49,5	8,0–12,0 (первич- ный)	0,5–1,0 (вторич- ный)	7,5–11,0	[15]
Картон/ бумага	5,0–6,0 (варка целлю- лозы, сушка)	0,6 (пульпер, формование, сушка)	4,4–5,4	0,8–1,2	0,3–0,5	0,5–0,7	[16]
Керамика (Al ₂ O ₃)	35,0–40,0 (синтез, спекание)	18,0 (дробление, помол, смешение, низкотемпера- турное спекание)	17,0–22,0	5,0–7,0	3,0–4,0	2,0–3,0	[18]

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Эти цифры подтверждают, что даже при консервативных оценках использование фабрикатора для смешанных отходов обеспечивает значительный экологический эффект.

Однако важно понимать, что представленная оценка не учитывает:

- выбросы при производстве самого фабрикатора (металлы, электроника, пластик) – для этого требуется полный анализ cradle-to-grave;

- деградацию полимеров при многократных циклах (снижение прочности требует больше материала для того же изделия);

- различия в качестве вторичного сырья (загрязнения, влажность);

- энергию на автономную работу ИИ-модулей (около 0,2 кВт·ч/кг – уже включена в E_{рец}).

Авторы отмечают, что предлагаемая архитектура находится на начальном уровне технологической готовности TRL 2, поскольку определены целевые области применения интеллектуальных фабрикаторов, сформулирована концепция данного устройства, определена его архитектура. Создание полностью интегрированного прототипа является задачей последующих этапов исследований ввиду отсутствия необходимого финансирования и технического оснащения.

Оценка энергопотребления и технико-экономическая оценка

Расчет для гипотетического фабрикатора производительностью 1 кг изделий

в час (смешанные отходы): суммарная мощность ~2,5–3,5 кВт (шредер 1 кВт, экструдер филамента 0,8 кВт, FDM-печать 0,6 кВт, ИИ-модуль 0,2 кВт). Энергопотребление на 1 кг изделия – 2–3 кВт·ч. Оценка стоимости компонентов (на 2026 г.) – 450–600 тыс. руб. (без учета НИОКР). Срок окупаемости при эксплуатации в удаленном поселке – 2–3 года. Данные значения энергопотребления являются консервативной оценкой совокупных энергозатрат для всех этапов, выполняемых фабрикатором (рециклинг и FDM-печать). Показатель в 2,5 кВт·ч/кг лежит в нижней части реалистичного диапазона для гипотетического компактного устройства, однако, оценивая более скептически вероятные затраты энергопотребления для других материалов, например алюминия, керамики, высокотемпературных филаментов, например нейлона, общие затраты могут достигать до 3,27–4,28 кВт·ч/кг [23].

Ограничения и пути преодоления

Ключевые инженерные проблемы: унификация узлов под разные материалы, самоочистка после переработки (например, остатки PLA в шнеке при переходе на PETG), калибровка многих приводов, миниатюризация. Предлагаемые решения:

- сменные технологические картриджи (шредер + экструдер) для каждого класса материалов, заменяемые манипулятором;

– автоматическая продувка сжатым воздухом (10 бар) и промывка растворителем (для ABS – лимонен);

– эталонная калибровка по меткам компьютерного зрения (ArUco) перед каждым циклом;

– электропотребление не более ≤ 3 кВт.

Предложенная архитектура отличается от аналогов комплексным применением ИИ (распознавание, планирование, диагностика) и мультиматериальностью. Однако остаются нерешенными вопросы долговременной стабильности полимеров после многократного рециклинга (требуется экспериментальные исследования по [9, 17]), а также точность спектроскопии при загрязнении сырья. TRL предлагаемой концепции не превышает 2, тогда как промышленные аналоги (Rheinmetall) находятся на уровне 5–6. Для повышения TRL необходимо создание лабораторного прототипа, отработка очистки и валидация нейросетевых моделей на реальных отходах. Авторы осознают, что предложенная архитектура требует создания действующего прототипа для подтверждения заявленных характеристик (производительности, энергоэффективности, качества рециклинга). Однако на момент проведения исследования финансирование для изготовления и испытаний опытного образца отсутствовало. В связи с этим работа ограничена концептуальной проработкой, а оценка TRL дана на уровне 2, что соответствует текущей стадии проекта. Дальнейшие этапы (конструирование, сборка, валидация) возможны при привлечении целевых инвестиций или грантовой поддержки.

Выводы

1. Анализ существующих аналогов (NASA Refabricator, Rapidia, Rheinmetall, PetBot, Precious Plastic) показал, что ни одна из систем не сочетает мультиматериальную переработку (полимеры, алюминий, картон, керамика), ИИ-управление и мобильность в одном устройстве. Предлагаемая концепция интеллектуального фабрикатора заполняет этот пробел, находясь на начальном уровне технологической готовности (TRL 2).

2. Разработана трехмодульная архитектура ИИ, включающая сенсорный анализатор (распознавание материалов и 3D-моделей), технологический планировщик (оптимизация циклов переработки и печати) и диагност-диспетчер (безопасность, прогноз отказов, взаимодействие с пользователем). Определены программно-аппаратные стеки реализации (YOLOv9, PyTorch, ROS2, ESP32) и требования к вычислительным ресурсам (≥ 64 ГБ ОЗУ, 12–14 ГБ видеопамети).

3. Составлены технологические цепочки для пяти классов материалов (PLA, PETG, ABS, алюминий, картон/бумага, керамика) с указанием температуры обработки, энергопотребления, опасных факторов и качества вторсырья. Для полимеров установлено снижение прочности на 15–25% после трех циклов рециклинга.

4. Предварительная оценка жизненного цикла (LCA) по методу избежания нагрузки (ГОСТ Р ИСО 14044-2021) показала, что использование фабрикатора для смешанных отходов (50% полимеры, 30% картон, 15% алюминий, 5% керамика) позволяет достичь средневзвешенной экономии энергии ~ 17 кВт·ч/кг и снижения выбросов $\text{CO}_2 \sim 2,7$ кг/кг готового изделия. Наибольший вклад вносит рециклинг алюминия (экономия до 45 кВт·ч/кг).

5. Идентифицированы ключевые инженерные ограничения: унификация узлов под разные материалы, обеспечение самоочистки, автоматическая калибровка, миниатюризация. Предложены способы их преодоления (сменные картриджи, воздушная продувка, калибровка по ArUco-меткам). Отсутствие финансирования на текущем этапе ограничивает работу концептуальной проработкой и не позволяет создать действующий прототип.

6. При условии успешного прототипирования и решения инженерных задач интеллектуальные фабрикаторы могут рассматриваться как перспективное направление для снижения нагрузки на полигоны ТКО, автономного производства в удаленных регионах (Арктика, геологоразведка), оборонных применений (полевое производство деталей) и научно-исследовательских целей. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание лабораторного образца и экспериментальную валидацию заявленных характеристик.

Список литературы

1. Precedence Research. 3D Printing Market Size to Exceed USD 134.58 Billion by 2034 // Yahoo! Finance. 2025. 15 апр. [Электронный ресурс]. URL: <https://finance.yahoo.com/news/3d-printing-market-size-exceed-150000314.html> (дата обращения: 17.05.2026).
2. Распоряжение Правительства РФ от 14 июля 2021 г. № 1913-р (ред. от 21 октября 2024 г.) «Об утверждении Стратегии развития аддитивных технологий в РФ на период до 2030 года» [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_390609/ (дата обращения: 17.05.2026).
3. Чернышова А. В., Филатова В. В., Пугачева И. Н. Проблемы и инновационные решения переработки и использования вторичных полимерных материалов // Проблемы и инновационные решения в химической технологии. 2016. Воронеж: ВГУИТ, 2016. С. 28–30. EDN: XCAVRV.
4. Rheinmetall presents Mobile Smart Factory for mobile production of spare parts for Battle Damage Repair // Rheinmetall. 2023. 28 June. URL: <https://www.rheinmetall.com/>

en/media/news-watch/news/2023/june/2023-06-28-mobile-smart-factory (дата обращения: 17.05.2026).

5. Ноцуманов Д. Н. Применение нейронных сетей в 3D-печати // *Наукосфера*. 2025. С. 27–30. DOI: 10.5281/zenodo.15639233.

6. Ваганов К. В., Драпак К. А., Фомин В. С. Автоматическое обнаружение дефектов в процессе печати FDM 3D-принтеров с помощью нейросетевых технологий // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2025. № 1. С. 57–62. URL: <http://opac.ntbminprom.ru/opac/index.php?url=/notices/index/IdNotice:783460/Source:default> (дата обращения: 17.05.2026).

7. Seredkin A. V., Tokarev M. P., Plohih I. A., Gobyrov O. A., Markovich D. M. Development of a method of detection and classification of waste objects on a conveyor for a robotic sorting system // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1359. P. 012127. DOI: 10.1088/1742-6596/1359/1/012127.

8. Прокашев В. А. Возможности улучшения применения компьютерного зрения в сортировке твердых коммунальных отходов // *Отходы и ресурсы*. 2024. Т. 11. № 2. С. 1–17. DOI: 10.15862/04INOR224.

9. Хасанов Б. Д., Алленов Д. Г., Алленов М. Г., Дейнова К. Б. Механические свойства ABS, PETG и PLA пластиков, полученных по FDM-технологии // *Технология машиностроения*. 2023. № 8. С. 5–12. EDN: OZHTZU.

10. Vink E. T. H., Rábago K. R., Glassner D. A., Gruber P. R. Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production // *Polymer Degradation and Stability*. 2003. Vol. 80 (3). P. 403–419. DOI:10.1016/S0141-3910(02)00372-5.

11. Ulkir O. Energy-Consumption-Based Life Cycle Assessment of Additive-Manufactured Product with Different Types of Materials // *Polymers*. 2023. Vol. 15. Is. 6. P. 1466. DOI: 10.3390/polym15061466.

12. Власов В. В., Исаев А. Н., Шалыгина Т. А., Воронина С. Ю. Технология получения филамента для 3D-печати из вторичного полиэтилентерефталата // *Пластические массы*. 2022. № 7–8. С. 48–50. EDN: ZBMSYJ.

13. Rajendran S., Scelsi L., Hodzic A., Soutis C., Al-Maadeed M. A. Environmental impact assessment of composites containing recycled plastics // *Resources, Conservation and Recycling*. 2012. Vol. 60. P. 131–139. DOI: 10.1016/j.resconrec.2011.11.006.

14. International Aluminium Institute. As well as aluminium recycling, saving 95% of the energy needed for primary aluminium production, the recycling process saves a similar percentage in greenhouse gas emissions [Электронный ресурс]. URL: <https://international-aluminium.org/landing/as-well-as-aluminium-recycling-saving-95-of-the-energy-needed-for-primary-aluminium-production-the-recycling-process-saves-a-similar-percentage-in-greenhouse-gas-emissions/> (дата обращения: 09.06.2026).

15. Raabe D. Green Aluminium: The Scientific and Engineering Foundations of Sustainable Light Metals // *Metallurgical Materials Science and Alloy Design*. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dierk-raabe.com/introduction-to-sustainable-aluminium/> (дата обращения: 09.06.2026).

16. Laurijssen J., Marsidi M., Westenbroek A., Worrell E., Faaij A. Paper and biomass for energy? The impact of paper recycling on energy and CO₂ emissions // *Resources, Conservation and Recycling*. 2010. Vol. 54. Is. 12. P. 1208–1218. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.03.016.

17. Еренков О. Ю., Уманец И. Ф., Зайцева Н. Б. Новый подход к рециклингу термопластичных полимеров // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2016. Т. 21. № 2. С. 72–75. URL: <https://resar.elpub.ru/jour/article/view/749> (дата обращения: 09.06.2026).

18. Ibáñez-Forés V., Bovea M. D., Simón A. Life cycle assessment of ceramic tiles. Environmental and statistical analysis // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2011. Vol. 16. Is. 9. P. 916–928. DOI: 10.1007/s11367-011-0322-6.

19. Попова Е. А., Букреева Т. М. Получение новых функциональных материалов на основе вторичного пластика // *Химия и химическая технология в XXI веке: материалы XXIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л. П. Кулева и Н. М. Кижнера, посвященной 85-летию со дня рождения профессора А. В. Кравцова*. Т. 2. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 432–433. EDN: LBYYZS.

20. Скориков Н. Д., Страхов А. В. Использование модульного технологического комплекса переработки полимерных отходов // *Экологические проблемы промышленных городов*. Саратов: Амирит, 2023. С. 242–247. EDN: NXYFSY.

21. Зименко К. В., Афанасьев М. Я., Колесников М. В. Контроль динамики экструзии при трехмерной печати изделий // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2022. № 22 (5). С. 929–940. DOI: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-929-940.

22. ГОСТ Р ИСО 14044–2021 Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и рекомендации = Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 октября 2021 г. № 1100-ст: дата введения 2022-01-01. М.: ФГБУ «РСТ», 2021. IV, 54 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://protect.gost.ru/gost/details/4b5e73f8-bd5d-4191-8907-714cedd20528> (дата обращения: 08.06.2026).

23. Ulkir O., Kuncan M. Environmental Impact Assessment of FDM-Fabricated Ankle Foot Orthosis Device Using Thermoplastic Materials // *J. of Materi Eng and Perform*. 2026. Vol. 35. P. 6228–6239. DOI: 10.1007/s11665-025-12137-x.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.