

УДК 67.02

Применение локальных нейросетевых моделей для прогнозирования усталостной долговечности изделий аддитивного производства

Мясников Дмитрий Владимирович^(*)

d-miasnikof@yandex.ru

Хлыбов Александр Анатольевич

hlybov_52@mail.ru

НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Тезис посвящен проблеме прогнозирования усталостной долговечности материалов и изделий, изготавливаемых аддитивными технологиями (АТ). Рассмотрен потенциал применения нейронных сетей (НС) для анализа диагностических данных и построения предиктивных моделей ресурса. Особое внимание уделено архитектуре развертывания подобных систем: обоснована необходимость и преимущества локального размещения специализированных нейросетевых моделей на серверах промышленного предприятия в сравнении с использованием универсальных облачных ИИ-сервисов. Проанализирована ключевая проблема «галлюцинаций» ИИ — систематических ошибок генерации, и поставлена задача исследования причин их возникновения в материаловедческих моделях и разработки методов их снижения для повышения надежности прогноза.

Ключевые слова: аддитивные технологии, прогнозирование, долговечность, нейронные сети, промышленный искусственный интеллект, галлюцинации искусственного интеллекта

Введение. Одной из критических задач при внедрении аддитивных технологий (АТ) в ответственные отрасли является достоверная оценка и прогнозирование усталостной долговечности изготавливаемых деталей. Сложная, часто неоднородная и анизотропная структура АТ-материалов, наличие пор и остаточных напряжений делают неприменимыми традиционные детерминированные модели расчета ресурса [1]. Это формирует запрос на создание методов, способных выявлять скрытые корреляции между множеством параметров: результатами неразрушающего контроля (НК) микроструктуры и механическими испытаниями готовых образцов. Современным инструментом для выявления таких многомерных зависимостей являются нейронные сети, успешно применяемые в смежных областях диагностики [2, 3]. Однако их эффективное внедрение в промышленный цикл требует решения не только алгоритмических, но и архитектурных задач, связанных с надежностью, безопасностью и адаптируемостью моделей.

Методы и материалы; результаты. В контексте прогнозирования усталости перспективным является подход, основанный на анализе сигналов предшествующего разрушению состояния. Например, метод акустической диагностики с применением вейвлет-преобразования и самоорганизующихся сетей Кохонена, описанный для вращающихся узлов [2], может быть адапти-

рован для мониторинга накопления усталостных повреждений в АТ-изделиях. Нейросеть, обученная на акустической эмиссии при циклических испытаниях, способна классифицировать стадии зарождения и развития микротрещин, становясь основой для предиктивной модели.

Для интегрирования разнородных данных (геометрия дефектов по рентгеновской томографии, результаты микроскопии, данные о режимах печати) и получения комплексной оценки остаточного ресурса перспективны более сложные гибридные архитектуры. Комбинация нейронных сетей и нечетко-логических экспертных систем, как показано в работе по оценке ресурса оборудования [3], позволяет формализовать известные материаловедческие закономерности (в виде правил нечеткого вывода) и дополнить их скрытыми зависимостями, извлеченными НС из экспериментальных данных. Это создает основу для построения цифровых двойников партий АТ-изделий, прогнозирующих их долговечность.

Ключевым аспектом практической реализации является выбор платформы для развертывания таких ИИ-моделей. В отличие от популярных универсальных сетевых сервисов (ChatGPT, DeepSeek, Grok), локальные нейросетевые модели, развернутые на серверах предприятия, обладают рядом критических преимуществ для промышленного применения, такими как:

- конфиденциальность и безопасность — обработка чувствительных данных о конструкциях и дефектах происходит внутри периметра предприятия, без риска утечки;
- детерминированность и надежность — модель работает на известном и стабильном аппаратном обеспечении, ее работа не зависит от доступности интернета, задержек в сети или изменений в облачном API;
- кастомизация и эффективность — модель может быть оптимизирована под конкретный класс материалов, тип АТ-установки и номенклатуру изделий, что повышает точность и снижает вычислительные затраты;
- интеграция в промышленные системы — локальная модель может быть напрямую встроена в SCADA-системы или ПО для управления производством, обеспечивая анализ в реальном времени.

Основным недостатком локального подхода являются высокие первоначальные затраты на разработку, сбор обучающих данных и развертывание инфраструктуры, а также необходимость наличия компетентных кадров в области машинного обучения.

Независимо от платформы развертывания, фундаментальным вызовом для применения НС в прогнозировании усталости является феномен «галлюцинаций» — генерации моделью правдоподобных (или не очень), но физически некорректных или ложных предсказаний. В контексте материаловедения это может выражаться в некорректном прогнозе срока службы, не обнаружении критического дефекта или ошибочной классификации механизма разрушения. Причины таких ошибок могут быть комплексными: недостаточный или несбалансированный набор обучающих данных, неучтенные физические ограничения в архитектуре модели, экстраполяция за пределы обученной области параметров.

В связи с этим, актуальной научно-практической задачей является разработка методологии выявления, анализа и снижения «галлюцинаций» в специализированных нейросетях, предназначенных для прогнозирования усталостной долговечности АТ-материалов. Решение этой задачи должно лежать на стыке машинного обучения и физики разрушения и включать: создание методов валидации прогнозов НС на основе фундаментальных материаловедческих принципов; разработку архитектур моделей, внутрь которых заложены физические ограничения; формирование стратегий активного обучения для целенаправленного пополнения набора данных в областях, где модель наименее уверена.

Заключение. Прогнозирование усталостной долговечности АТ-изделий с помощью нейронных сетей представляет собой перспективное направление, способное преодолеть ограничения классических методов. Для успешного промышленного внедрения целесообразна разработка специализированных, кастомизированных нейросетевых моделей, развертываемых локально на предприятиях. Это обеспечит необходимый уровень контроля, безопасности и интеграции в технологические процессы. Ключевым направлением будущих исследований в рамках данной темы является разработка методического и программного обеспечения для создания локальных нейросетевых систем прогнозирования усталости, включающего методы сбора и агрегации материаловедческих данных, алгоритмы обучения с учетом физических ограничений материалов и механизмы валидации для минимизации «галлюцинаций» модели. Решение этих задач позволит создать надежный инструмент для оценки и обеспечения долговечности изделий, изготавливаемых аддитивными технологиями.

Список источников

- [1] Чумаевский А.В., Осипович К.С., Семенчук В.М., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А. Особенности получения и организации структуры крупногабаритных функционально-градиентных биметаллических элементов на основе нержавеющей стали и меди методом электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*, 2024, № 1 (47), с. 47–57.
- [2] Допира Р.В., Маслов Ф.Д., Королев В.В., Шароглазов В.Б. Метод акустической диагностики вращающихся частей антенно-фидерных устройств с применением самообучающейся нейросети. Т-Сomm: *Телекоммуникации и транспорт*, 2017, т. 11, № 10, с. 45–50.
- [3] Бурков Д.И., Гаев Л.В. Использование нечетко-логических экспертных систем для оценки остаточного ресурса оборудования. *Инновационная наука*, 2024, № 12–2–1, с. 102–104.