

УДК 004.9:621.74

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ INDUSTRY 4.0: ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ И ПРЕДИКТИВНАЯ АНАЛИТИКА В ЛИТЕЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

И. И. ШАЙХУТДИНОВА

Уфимский университет науки и технологий

Уфа, Россия

Внедрение концепции Industry 4.0 в литейное производство позволяет значительно повысить эффективность процессов, минимизировать производственные дефекты и снизить затраты. Рассматриваются ключевые технологии цифровых двойников и предиктивной аналитики, их применение для моделирования литейных процессов, прогнозирования дефектов отливок и оптимизации производства. Особое внимание уделяется алгоритмам машинного обучения, используемым для прогнозирования дефектов, а также интеграции данных сенсоров и производственных систем в режиме реального времени.

Литейное производство остается одним из наиболее сложных и затратных процессов в машиностроении. Традиционные методы контроля качества зачастую не позволяют своевременно выявлять дефекты, что приводит к увеличению брака и дополнительным производственным издержкам [1]. Однако развитие технологий Industry 4.0, включая цифровые двойники и предиктивную аналитику, предоставят новые возможности для оптимизации управления технологическими процессами.

Цифровой двойник (Digital Twin) – это виртуальная копия физического объекта или процесса, созданная с помощью математического моделирования и анализа данных в реальном времени [2]. В сочетании с предиктивной аналитикой на основе машинного обучения этот подход помогает прогнозировать дефекты до их фактического возникновения.

Цифровой двойник литейного процесса включает несколько ключевых компонентов.

1. Физическое моделирование (теплообмен, кристаллизация сплава, остаточные напряжения) на основе методов вычислительной гидрогазодинамики (CFD) и конечных элементов (FEA).

2. Данные сенсоров и датчиков (температура металла, скорость охлаждения, давление в форме), передаваемые с производственной линии в режиме реального времени.

3. Оптимизация технологических параметров (скорость заливки, состав сплава, температура формы) с использованием методов глубокого обучения.

Применение цифровых двойников позволяет сократить количество физических экспериментов, снижая затраты на разработку новых сплавов и технологий литья. Подходы машинного обучения позволяют обучать цифровые двойники на исторических данных, что повышает точность прогнозирования.

Предиктивная аналитика использует статистические модели и искусственный интеллект (ИИ) для предсказания качества отливок на ранних стадиях производства. Основные методы включают следующее.

1. Линейные и нелинейные регрессионные модели применяются для прогнозирования вероятности возникновения брака на основе параметров плавки и заливки. Например, метод множественной регрессии позволяет связать температуру металла, содержание углерода и скорость охлаждения с вероятностью образования раковин или горячих трещин.

2. Сверточные нейронные сети (CNN) используются для анализа изображений термографии и рентгеновских снимков, автоматически классифицируя дефекты (поры, включения, недоливы). Рекуррентные нейронные сети (RNN) и их модификации (LSTM, GRU) применяются для временных рядов, таких как температурные колебания в форме, что позволяет прогнозировать неравномерность кристаллизации.

3. Графовые нейронные сети (GNN) анализируют взаимосвязи между узлами производственной системы (печи, формы, транспортные системы), выявляя скрытые зависимости. Методы ансамблирования повышают точность предсказаний за счет агрегации множества слабых моделей.

Даталогические системы (SCADA, MES) интегрируют данные с датчиков температуры, давления и химического состава сплава [3].

Внедрение систем цифровых двойников и предиктивной аналитики трансформирует литейное производство, принося конкретные экономические и технологические выгоды:

- 1) существенное сокращение производственного брака – по различным оценкам, снижение достигает 20 %...40 % от первоначального объема;
- 2) повышение ресурсной эффективности – оптимизируется расход дорогостоящих сырьевых материалов и энергоносителей;
- 3) сокращение операционных простоев – время, необходимое для перенастройки и переналадки технологического оборудования, уменьшается;
- 4) повышение качества управления – принятие решений основывается на точных данных и прогнозах, а не на эмпирическом опыте.

Использование этих технологий формирует новый вектор развития для литейной отрасли, создавая фундамент для перехода к полностью автоматизированным и интеллектуальным производствам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шайхутдинова, И. И.** Гибридная экспертная система повышения качества алюминиевых отливок / И. И. Шайхутдинова // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста : материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф., Уфа, 12–13 нояб. 2024 г. – Уфа: Уфим. ун-т науки и технологий, 2025. – С. 23–26.
2. **Шайхутдинова, И. И.** Методы искусственного интеллекта при выявлении дефектов отливок / И. И. Шайхутдинова // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 24–25 окт. 2024 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2024. – С. 190–191.
3. **Шайхутдинова, И. И.** Применение информационных технологий в литейном производстве / И. И. Шайхутдинова, Е. С. Гайнцева // Литейное производство. – 2024. – № 1. – С. 31–36.