УДК 621.78.048.7:519.876.5:004.89

НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ СТАЛЕЙ

А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК[1], А. Е. ЖЕЛТКОВИЧ[1], В. В. МОЛОШ[1], С. В. САВЧУК[1], А. А. ШЕЙКО[1], П. В. МАЗУРИК[1], С. Г. КРАСОВСКИЙ[2], J. YANG[3], T. PANG[3]
[1]Брестский государственный технический университет
Брест, Беларусь
[2]Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь
[3]Dalian University of Technology
School of Mathematical Sciences; Key Laboratory for Computational Mathematics and Data Intelligence of Liaoning Province
Dalian, China

Высокоточная лазерная обработка конструкционных металлов и сплавов выступает ключевым драйвером развития современного автоматизированного машиностроения и аддитивного производства. Тем не менее эксплуатационные свойства, структурно-фазовое состояние и геометрическая точность финишных изделий находятся в жесткой зависимости от пространственно-временной конфигурации температурных полей, формирующихся непосредственно в зоне теплового контакта. Избыточное энерговыделение или деструктивно высокие темпы кристаллизации и охлаждения провоцируют внутренние механические напряжения, возникновение микротрещин, нежелательные фазовые трансформации и деформацию макроструктуры сплава. Традиционная регистрация термических показателей посредством стандартных термопарных датчиков или инфракрасных оптических пирометров существенно усложнена вследствие экстремальной динамики процессов, локальности зоны воздействия и экранирующих эффектов. Классические подходы численного моделирования (метод конечных элементов) требуют колоссальных системных ресурсов и детального знания нестационарных теплофизических коэффициентов, которые динамически меняются в процессе нагрева. В сложившихся условиях критически важным вектором исследований становится синтез интеллектуальных скоростных алгоритмов вычислительной аппроксимации. Использование многослойных искусственных нейронных сетей (ИНС) предоставляет радикально новые аналитические инструменты для предиктивного мониторинга тепловых полей в дискретном масштабе реального времени [1], комбинируя математическую строгость и высокую скорость генерации откликов на основе накопленного пула экспериментальных паттернов.

Проектируемая вычислительная архитектура базируется на концепции многослойного полносвязного перцептрона (MLP), развернутого средствами специализированного высокоуровневого прикладного интерфейса TensorFlow

Keras [2]. Данный стек программирования автоматизирует тензорные вычисления, оптимизируя процедуры обратного распространения ошибки.

Математический контур нейросетевой модели структурирован следующей последовательностью функциональных уровней:

– входной сенсорный слой;

– первичный скрытый вычислительный уровень;

– вторичный скрытый уровень абстракции;

– третий скрытый уровень фильтрации;

– выходной целевой слой.

Интерактивное взаимодействие с программной системой реализовано в виде адаптивных веб-форм. Первичный этап предполагает загрузку массивов данных и сопутствующих технологических параметров через соответствующую диалоговую форму. После накопления достаточного репрезентативного объема экспериментальных точек система автоматически активирует фоновый поток обучения нейросетевой модели. Итоговый интерфейс предоставляет оператору удобный функционал ввода гипотетических параметров для мгновенного получения прогностических значений температурного профиля в контрольных точках детали.

Специализированный программный модуль берет на себя задачи низкоуровневого сопряжения с аппаратными измерительными комплексами, валидации структуры временных рядов, синтаксического разбора файлов электронных таблиц и индексирования нормализованной информации в среде реляционного хранилища:

1) процедура обработки и предобработки (/upload);

2) алгоритмы нормализации временных интервалов;

3) контур сохранения файлов и СУБД.

Информационная схема БД разворачивается автоматически при инициализации системы посредством триггеров CREATE TABLE IF NOT EXISTS. Итоговая таблица агрегирует как первичный идентификатор (id) и числовые показатели физических полей (time, temperature), так и комплекс сопутствующих технологических параметров эксперимента. Разработанный комплекс демонстрирует высокую надежность и стабильность прогнозирования тепловых состояний при лазерном термоупрочнении сталей на базе нейросетей TensorFlow Keras, обладая широкими возможностями для масштабирования на другие классы конструкционных материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Application of Neural Networks and Soft Computing in Predictive Modeling of Laser Thermal Hardening / M. Kowalski, J. Novak, L. Szabo [et al.] // International Journal of Thermal Sciences. – 2025. – Vol. 194. – Art. 108520.

2. **Смит, Дж.** Глубокое обучение и нейросетевые технологии на практике с использованием экосистемы TensorFlow и Keras : пер. с англ. / Дж. Смит, К. Браун. – М. : Лаборатория знаний, 2022. – 720 с.