

Нейро-нечеткое моделирование лазерного легирования стали 30ХГСН2А

Ю. В. Никитюк¹, А. Г. Баевич¹, А. В. Максименко¹,
В. В. Ким², Ш. Р. Камалов², И. Ю. Аушев³

¹Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, г. Гомель, Беларусь,

²Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова АН Республики Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан,

³Университет гражданской защиты, г. Минск, Беларусь,

nikitjuk@gsu.by

Аннотация. В работе выполнено нейро-нечеткое моделирование лазерного легирования хромом конструкционной стали 30ХГСН2А. Конечно-элементное моделирование лазерного легирования стали было выполнено с учетом зависимости теплофизических свойств материалов от температуры в программе ANSYS. Была сформирована нейро-нечеткая модель лазерного легирования стали 30ХГСН2А с использованием градецентрированного варианта центрального композиционного плана эксперимента. В качестве факторов эксперимента использовались временные интервалы, соответствующие длительностям трех фронтов лазерного импульса, и пиковые плотности мощности этих фронтов. В качестве откликов использовались максимальные температуры в зоне обработки. Проведена проверка модели на тестовом наборе данных.

I. Введение

В настоящее время используются различные технологии, обеспечивающие формирование заданных свойств поверхности изделий при сохранении свойств основного материала. Одними из наиболее перспективных технологий являются технологии лазерной обработки, к ключевым достоинствам которых относятся возможность создания покрытий из различных материалов и возможность обработки изделий практически любых размеров и геометрии. Среди технологий лазерной обработки широкое распространение получило лазерное легирование, являющееся эффективным методом улучшения поверхностных свойств металлов. Лазерное легирование позволяет изменять состав и структуру поверхностного слоя изделия с помощью высокоэнергетического лазерного воздействия, обеспечивая высокую точность обработки и улучшение эксплуатационных характеристик материала [1-2].

Искусственные нейронные сети характеризуются эффективностью моделирования сложных взаимосвязей между входами и выходами системы и успешно применяются для моделирования процессов лазерной обработки материалов [3-5]. Средствами теории нечетких множеств можно отразить произвольную взаимосвязь «вход - выход» без использования сложного математического аппарата, при этом нечеткое моделирование также применяется для исследования процессов лазерной обработки. Нейросетевые модели, как правило, требовательны к качеству и объему обучающей выборки. К недостаткам нечетких моделей можно отнести зависимость от экспертного знания при формировании нечетких правил. Эти недостатки можно устранить за счет интеграции искусственных нейронных сетей в систему нечеткого вывода. Данный подход позволяет обучать такие системы без привлечения экспертов, а гибридные сети обеспечивают возможность сочетания преимуществ двух подходов, что позволяет преодолевать основные ограничения каждого из них [6].

Система ANFIS является примером эффективной реализации нейро-нечеткого подхода. В данной работе с использованием нейро-нечетких сетей ANFIS выполнено моделирование лазерного легирования хромом конструкционной стали 30ХГСН2А.

II. Определение параметров лазерного легирования

Расчет температур был выполнен с использованием программы конечно-элементного анализа ANSYS. Расчетная модель представляла собой пластину из стали 30ХГСН2А размерами 3x3x1 мм, на поверхность которой был нанесен слой обмазки толщиной 100 мкм, содержащий легирующий компонент. При этом обеспечивалось образование равномерно оплавленного слоя. Схема воздействия лазерного излучения на обрабатываемую поверхность представлена на рисунке 1.

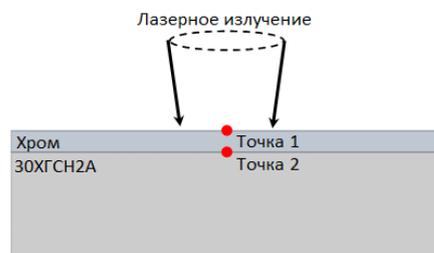


Рис. 1. Схема воздействия лазерного излучения

При численном эксперименте был использован шестифакторный границентрированный вариант центрального композиционного плана. В качестве факторов эксперимента использовались временные интервалы t_1 , t_2 , t_3 , соответствующие длительностям трех фронтов лазерного импульса, и пиковые плотности мощности этих фронтов p_1 , p_2 , p_3 (рисунок 2).

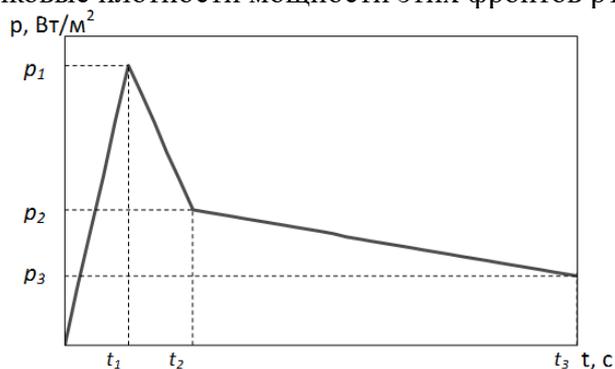


Рис. 2. Форма импульса лазерного излучения

В качестве откликов использовались температуры в зоне обработки: T_1 , T_2 и T_3 – температуры на поверхности нанесенного слоя обмазки, содержащей легирующий компонент в моменты времени, соответствующие завершениям первого, второго и третьего фронтов лазерного импульса соответственно; T_4 – температура на глубине 100 мкм в момент времени, соответствующий завершению третьего фронта лазерного импульса.

Обучение нейро-нечеткой системы ANFIS проводилось на наборе данных, полученных в результате численного эксперимента в течение 20 эпох. Пример диаграммы, показывающей зависимость максимальной температуры T_1 от параметров обработки, полученных с использованием системы ANFIS, представлен на рисунке 3.

Тестовая выборка была сформирована при решении соответствующих задач методом конечных элементов в программе ANSYS. Для оценки полученных нейро-нечетких моделей были использованы следующие критерии: коэффициент детерминации R^2 , средняя абсолютная ошибка (англ. Mean Absolute Error, MAE), средняя квадратичная ошибка (англ. Root Mean Square Error, RMSE), средняя абсолютная процентная ошибка (англ. Mean Absolute Percentage Error, MAPE).

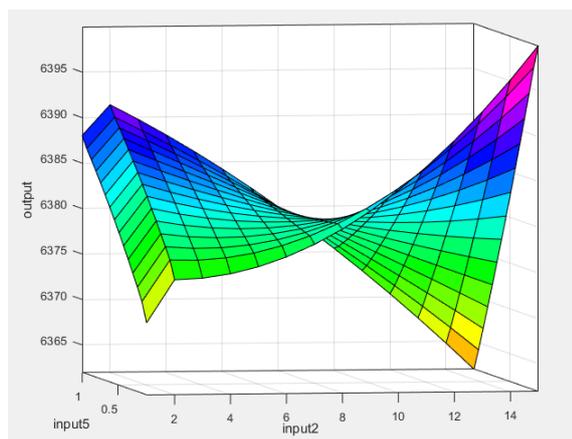


Рис. 3. Зависимость T1(K) от параметров обработки input2 = t1 (мс) и input5 = p2 (Вт/м² • 10⁹)

В таблице 1 представлены результаты оценки соответствующих нейро-нечетких моделей.

Таблица 1. Результаты оценки моделей

	T1	T2	T3	T4
<i>RMSE</i>	411 К	169 К	250 К	149 К
<i>MAE</i>	355 К	150 К	218 К	133 К
<i>MAPE</i>	6.7 %	5.3 %	5.0 %	6.4 %
<i>R²</i>	0.9802	0.9808	0.9747	0.9795

Полученные данные показывают наличие необходимого соответствия нейро-нечеткой модели результатам конечно-элементного анализа, что позволяет сделать вывод о том, что при прогнозировании параметров лазерного легирования возможно использование нейро-нечетких моделей.

III. Заключение

В результате выполненных исследований показана возможность определения режимов лазерного легирования конструкционных сталей на основе сочетания метода конечных элементов и нейро-нечетких моделей.

Литература

- [1] А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюрюв. Технологические процессы лазерной обработки. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006, 664с.
- [2] О. Г. Девойно [и др.]. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки. Минск : БНТУ, 2020, 280с.
- [3] Prashant P Kharche and Vijay H Patil, "Systematic review of optimization techniques for laser beam machining." Engineering Research Express, Vol 6, № 2, 2024.
- [4] Y. Nikitjuk, G. Bayevich, V. Myshkovets, A. Maximenko, I. Aushev, "Characterization of Laser Welding of Steel 30XГCH2A by Combining Artificial Neural Networks and Finite Element Method" In: *Research and Education: Traditions and Innovations. INTER-ACADEMIA 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 422. Springer, Singapore, 2022, pp.273-279.
- [5] Г. А. Баевич, Ю. В. Никитюк, А. В. Максименко, В. Н. Мышковец, И. Ю. Аушев, "Оптимизация обработки стали 12Х18Н9Т кольцевыми лазерными пучками", *НАУКА и ТЕХНИКА*, 22(3), 2023, с. 186-192.
- [6] С.Д. Штовба. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. Москва, Горячая линия, 2007, 284с.