

увеличении количества периодов структуры, а рост величины периода приводит к сдвигу в длинноволновую область, что согласуется с моделью эффективной среды для описания ФК структур. При формировании фотонно-кристаллических структур с заданным спектральным положением необходимо учитывать химическое растворение стенок пор в процессе роста и компенсировать неизбежное уменьшение показателя преломления для постоянства оптического пути. Это достигается уменьшением количества заряда, прошедшего во время формирования периода. Для получения отделенных от алюминия ФК структур лучше использовать инертные по отношению к оксиду алюминия растворы. Иначе придется учесть сдвиг положения зоны, для этого эмпирическим путем определить скорости растворения АОА при разных температурах, изменение пористости и, соответственно, показателя преломления.

Литература

1. Santos, A. Nanoporous Anodic Alumina Photonic Crystals: Fundamentals, Developments and Perspectives / A. Santos // J. Mater. Chem. C. – 2017. – Vol. 5, №23. – P. 5581–5599.
2. Kushnir, S. E. Thickness-dependent iridescence of one-dimensional photonic crystals based on anodic alumina / S. E. Kushnir, K. S. Napolskii // Materials & Design – 2018. – Vol. 144. – P. 140–150.
3. Гасенкова, И. В. Анодирование алюминия в вязком электролите для формирования одномерных фотонных кристаллов / И. В. Гасенкова, Н. И. Мухуров, И. М. Андрухович // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 7–17.
4. Гасенкова, И. В. Угловые зависимости спектров зеркального отражения и цвета анодного оксида алюминия со свойствами фотонного кристалла / И. В. Гасенкова, Н. И. Мухуров, И. М. Андрухович // Нано- и микросистемная техника. – 2024. – Т. 26, № 1. – С.18–24.

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

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
г. Гомель, Республика Беларусь,

²Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У. А. Арифова
Академии Наук Республики Узбекистан,
г. Ташкент, Республика Узбекистан,

³Университет гражданской защиты,
г. Минск, Республика Беларусь

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ 30ХГСН2А

Для формирования заданных свойств поверхности изделий при сохранении свойств основного материала в настоящее время используются различные технологии: ионная обработка, газопламенная обработка, электронно-лучевая обработка и т. д. При этом лазерные технологии являются наиболее перспективными при обработке деталей машиностроительного назначения. К ключевым особенностям данных технологий относятся создание покрытий из различных материалов, гибкость, производительность, возможность обрабатывать изделия практически любых размеров и геометрии. Технологии лазерной обработки образуют группы, основанные на нагреве, плавлении и ударном нагружении материала

в зависимости от плотности излучения лазерного излучения и времени его воздействия. Среди технологий лазерной обработки широкое распространение получили легирование, закалка и наплавка. Лазерное легирование является высокоэффективным методом улучшения поверхностных свойств металлов и отличается от других методов обработки тем, что позволяет изменять состав и структуру поверхностного слоя изделия с помощью высокоэнергетического воздействия лазера, что обеспечивает высокую точность обработки и улучшение эксплуатационных характеристик материала [1, 2].

Распределение температур в обрабатываемом материале при лазерном воздействии является ключевой характеристикой, определение которой позволяет оптимизировать параметры обработки. При моделировании процессов лазерной обработки для расчета температурных полей в настоящее время широко применяется программа конечно-элементного анализа ANSYS. Также эффективным инструментом, успешно используемым для исследования лазерной обработки, являются искусственные нейронные сети. В ряде случаев при моделировании процессов лазерной обработки используется сочетание метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей [3–8].

В данной работе создана математическая модель процесса лазерного легирования поверхностей сталей, учитывающая температурные зависимости теплофизических свойств материалов, конвективный теплообмен и излучение с обрабатываемой поверхности. Определение температурного поля осуществлялось с применением программы конечно-элементного анализа ANSYS Workbench.

Расчетная модель представляет собой пластину из стали 30ХГСН2А размерами 3х3х1 мм, на поверхность которой нанесен слой обмазки толщиной 100 мкм, содержащий легирующие элементы и выгорающий при достижении температуры испаряющегося материала. При этом обеспечивается образование равномерно оплавленного слоя толщиной $h_{\text{лег}}$. Расчетная модель состоит из 12 768 элементов и 51 624 узлов (рисунок 1).

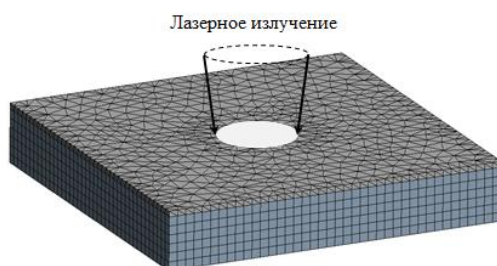


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель

На поверхность обмазки осуществляется воздействие излучением импульсного YAG:Nd⁺³-лазера, работающего в режиме свободной генерации. Форма импульса представлена на рисунке 2.

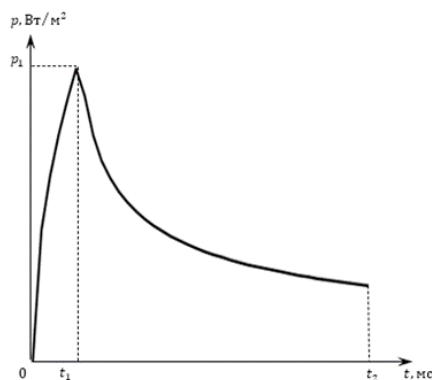


Рисунок 2 – Форма импульса лазерного излучения

Распределение плотности мощности импульса во времени задавалось в виде:

$$p(t) = \begin{cases} \frac{2T_m\lambda}{t_1\sqrt{\alpha\pi}}\sqrt{t}, & 0 < t \leq t_1 \\ \frac{2T_m\lambda}{t_1\sqrt{\alpha\pi}}(\sqrt{t} - \sqrt{t-t_1}), & t_1 < t \leq t_2 \end{cases},$$

где: λ – удельная теплопроводность легирующего материала;

α – температуропроводность легирующего материала;

T_m – температура плавления легирующего материала;

t_1 – время окончания первого фронта импульса;

t_2 – время окончания второго фронта импульса.

Импульс имеет крутой первый фронт, достигающий максимального значения, соответствующего плотности мощности, необходимой для плавления легирующего компонента на поверхности основы, убывающий второй фронт, обеспечивающий плавление всего слоя легирующего компонента и металла основы на заданную глубину с минимальным испарением, а также перемешивание фаз в зоне ванны расплава и кристаллизацию жидкой фазы.

Количество поглощенной материалом энергии определялось свойствами поверхности основного материала и толщиной обмазки.

Расчеты были выполнены для 60 вариантов входных параметров, 55 из которых были использованы для обучения искусственных нейронных сетей, а 5 для тестирования (таблица 1).

Для формирования искусственных нейронных сетей был использован оптимизатор Adam, функция потерь MSE и функция активации ReLU. Обучение нейронной сети осуществлялось на протяжении 300 эпох. В результате было обучено 16 искусственных нейронных сетей с количеством нейронов в двух скрытых слоях от 5 до 20 с шагом 5.

Таблица 1 – Тестовый набор данных

N	P_0 , Вт/м ²	t_1 , мс	t_2 , мс	T_1 , °C	T_2 , °C
1	1,8E+09	1	4	3 155,6	2 798,4
2	9E+08	0,5	6	1 106,6	1 067,4
3	6E+08	1	8	1 065,0	1 017,0
4	9E+08	1	8	1 587,4	1 515,3
5	1,2E+09	0,5	4	1 468,0	1 351,1

Для оценки полученных моделей использовались следующие критерии: средняя абсолютная ошибка (англ. MAE), средняя квадратичная ошибка (англ. RMSE), средняя абсолютная процентная ошибка (англ. MAPE) и коэффициент детерминации R^2 .

На рисунке 3 показаны тепловые карты, иллюстрирующие распределение валидационных ошибок MAPE при определении максимальных значений температуры T_1 .

Вертикальная и горизонтальная оси показывают соответственно количество нейронов в первом и втором скрытых слоях искусственной нейронной сети, а интенсивность цветового кодирования показывает величину ошибки: увеличение ошибки происходит при переходе от светлого тона к темному.

Наилучшие результаты при определении значений максимальных температур в зоне обработки показала нейронная сеть с архитектурой [3-5-15-2]. В таблице 2 представлены результаты оценки, соответствующей нейросетевой модели.

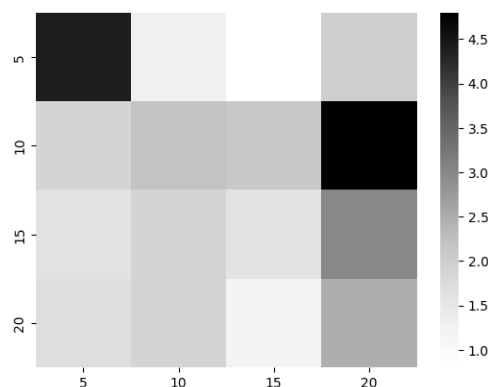


Рисунок 3 – Тепловая карта распределения MAPE при определении T_1

Таблица 2 – Результаты оценки нейросетевой модели

Критерий	T_1	T_2
RMSE	15,4 К	16,6 К
MAE	13,8 К	14,9 К
MAPE	0,8 %	1,0 %
R2	0,9996	0,9993

Результаты оценки полученной модели позволяют сделать вывод о необходимом соответствии с результатами конечно-элементных расчетов. Из данных, приведенных в таблице 2, видно, что нейросетевые модели обладают высокой эффективностью при прогнозировании выходных параметров процесса лазерного легирования стали 30ХГСН2А.

Литература

1. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки / О. Г. Девойно [и др.]. – Минск: БНТУ, 2020. – 280 с.
3. Применение метода конечных элементов и искусственных нейронных сетей для определения параметров лазерной обработки стали 12Х18Н9Т / Ю. В. Никитюк [и др.] // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого: научно-практический журнал. – 2022. – № 1. – С. 48–55.
4. Оптимизация параметров обработки стали 12Х18Н9Т круглыми лазерными пучками / Ю. В. Никитюк [и др.] // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. – 2022. – № 2(89). – С. 17–24.
5. Optimization of 12X18H9T-Steel Processing by Ring Laser Beams / G. A. Bayevich [et al.] // Science & Technique. – 2023. – № 22(3). – 186–192. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-186-192>.
6. Parameters optimization of pulsed laser cladding of steel 30KHGSN2A using a genetic algorithm / Yu. V. Nikitiuk, G. A. Bayevich, A. V. Maximenko, I. Yu. Aushev // Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo. – 2024. – № 1(96). – P. 63–71.
7. Yurkevich, S. N. Laser surfacing of components of 30KhGSA steel without reducing the physical-mechanical properties of the base material / S. N. Yurkevich, V. N. Myshkovets, A. V. Maksimenko // Welding International. – 2004. – Vol.18, № 10. – P. 829–830.
8. Юркевич, С. Н. Восстановление деталей из стали 30ХГСН2А наплавкой методом лазерной сварки / С. Н. Юркевич, В. Н. Мышковец, А. В. Максименко // Справочник. Инженерный журнал. – 2004. – № 5. – С.11–12.