

УДК 004.9

DOI: 10.18101/978-5-9793-1626-0-78-82

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА COMSOL MULTIPHYSICS

© **Лапина Анна Евгеньевна**

старший преподаватель кафедры вычислительной техники и информатики,
Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
Россия, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а
E-mail: ann_lapin@mail.ru

© **Смирнягина Наталья Назаровна**

доктор технических наук, доцент,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
Россия, 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40в
E-mail: smirnyagina09@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты трехмерного моделирования процесса электронно-лучевого воздействия на поверхность образца с использованием программного комплекса Comsol Multiphysics. Получено распределение температур по поверхности и вглубь образца в направлении движения электронного пучка на этапе нагрева и охлаждения. Проведено исследование особенностей ввода интенсивного сфокусированного электронного пучка в металлические сплавы. Представлены расчеты скоростей нагрева и охлаждения в зоне воздействия электронным пучком. Полученные численные результаты позволили исследовать закономерности распределения температур и скоростей ее изменения от действия электронного пучка.

Ключевые слова: математическое моделирование, тепловые процессы, титановый сплав ВТ-1, электронно-лучевая обработка, высококонцентрированные потоки энергии, электронный пучок

Для цитирования

Лапина А. Е., Смирнягина Н. Н. Моделирование электронно-лучевой обработки с использованием программного комплекса Comsol Multiphysics // Информационные системы и технологии в образовании, науке и бизнесе: материалы региональной научно-практической конференции с международным участием (Улан-Удэ, 1 июля 2021 г.) / отв. ред. А. А. Тонхоноева, науч. ред. Е. Р. Урмакшинова. Улан-Удэ: Изд-во Бурят. гос. ун-та, 2021. С. 78–82.

Введение

В современной металлургии все больше внимания уделяют модифицированию сплавов и композиционных материалов. Существует множество методов и способов повышения качественных характеристик поверхностных слоев: износостойкость, коррозионная стойкость, прочность и ряд других параметров. К одним из таких методов относится электронно-лучевая обработка [1]. Использование электронного пучка может позволить достичь таких результатов, которых невозможно достичь при использовании традиционных способов химико-термической обработки [2]. Однако остается открытым вопрос о моделировании процесса с использованием электронного пучка.

Постановка задачи. Особенности исследования

Моделирование процесса электронно-лучевого облучения проводилось с помощью программного обеспечения COMSOL Multiphysics (рис. 1).

Задачи о тепловых процессах, возникающих при воздействии высококонцентрированными потоками электронов, основаны на решении уравнения теплопроводности (1):

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla J, J = -\lambda\nabla T, \quad (1)$$

где c, ρ, λ — теплоемкость, плотность и теплопроводность, зависящие от температуры и координат [3].

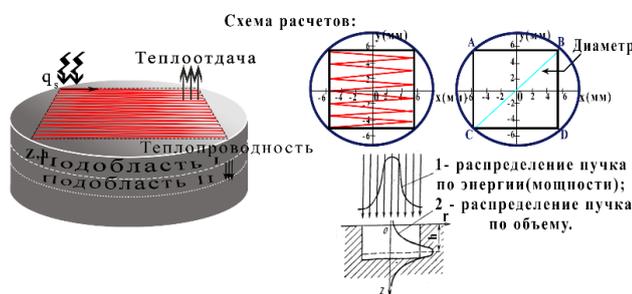


Рис. 1. Схема моделирования

Моделирование процесса электронно-лучевой обработки с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics было разделено на этапы:

1. Размерность модели. Была построена трехмерная модель процесса электронно-лучевого воздействия на поверхность образца.
2. Геометрия и глобальные переменные. Образец представлял собой цилиндрическую пластину: диаметр 15 мм и высота 7 мм. Смоделирована обмозка.
3. Глобальные параметры обработки. Были заданы глобальные параметры: ток, напряжение, мощность, радиус электронного пучка.
4. Выбор материалов. Для моделирования был выбран материал образца титановый сплав ВТ-1 и заданы его основные теплофизические свойства, обмозка — Бор (B, лат. borum).
5. Генерация сетки. Сетка — triangular, размер сетки — fine. Было использовано уплотнение адаптивной сетки в районе обмозки.
6. Физика и тип исследования. Рассматриваемый процесс, нестационарный — Time Dependent.

Для исследования изменения температуры, задания граничных условий и моделирования процесса воздействия электронным пучком на поверхность образца использовали модуль Heat Transfer in Solids (ht).

Распределение плотности тока по сечению луча близко к закону Гаусса [4], был выбран Distribution type: Gaussian. Тепловой источник был представлен в виде нормально распределенного по поверхности и объему.

$$f(O,e) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right), d = \frac{\|e \times (x-O)\|}{\|e\|}, \quad (2)$$

где σ — стандартное отклонение, O — координаты перемещения пучка.

Движение электронного пучка вдоль оси x и y задавалось с помощью функций Analytic и Interpolation (рис. 2).

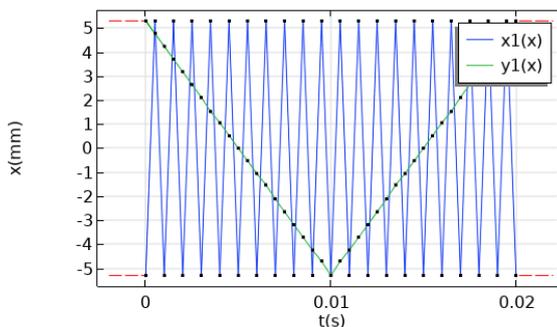


Рис. 2. Перемещение электронного пучка вдоль оси x и y

Результаты и их обсуждение

Были смоделированы температуры при перемещении электронного пучка по поверхности образца.

На рисунке 3 представлено распределение температур по поверхности и глубине образца после одного прохода электронным пучком и после 60 секунд обработки образца. После 60 секунд воздействия электронного пучка на поверхность образца температура составляла 626°C . В течение 60 секунд модель образца нагревается по глубине, однако нижняя часть образца остается холодной, что было связано с заданными условиями электронно-лучевой обработки [5].

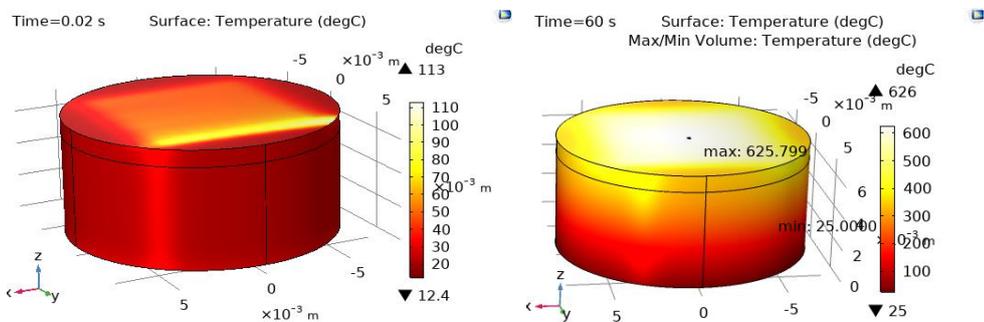


Рис. 3. Распределение температур по поверхности и объему образца через один проход (а), после 60 секунд обработки образца электронным пучком (б)

Максимальные температуры достигались на поверхности в центральной части образца, что обусловлено траекторией движения электронного пучка. При этом температуры в зоне теплового воздействия достигали порядка 2000°C .

На рисунке 4 представлены расчеты скоростей нагрева и охлаждения в зоне воздействия электронным пучком в процессе обработки образца. Они достигали порядка 10^4 – 10^5 К/с, что доказало, что процесс высокоскоростной.

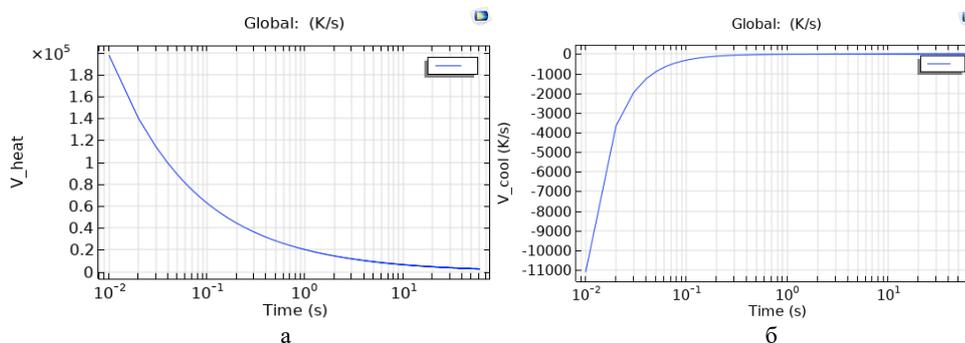


Рис. 4. Распределение скоростей: нагрева (а), охлаждения (б) в зоне воздействия электронного пучка

Выводы

Разработана модель экспериментального образца, подвергаемого воздействию электронного пучка, произведены выбор материала, параметров обмазки, построение сетки. Смоделирована трехмерная модель процесса электронно-лучевого воздействия на поверхность образца. Проведено исследование особенностей ввода интенсивного сфокусированного электронного пучка в металлические сплавы. Разработана модель воздействия электронным пучком на поверхность металлического сплава. Движение электронного пучка вдоль оси x и y задавалось с помощью функций Analytic и Interpolation. Получено распределение температур по поверхности и вглубь образца в направлении движения электронного пучка на этапе нагрева и охлаждения. Температуры в зоне теплового воздействия достигали порядка $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, представлены расчеты скоростей нагрева и охлаждения в зоне воздействия электронным пучком — 10^4 – 10^5 .

Литература

1. Лапина А. Е., Смирнягина Н. Н., Дашеев Д. Э. Моделирование тепловых процессов при обработке титанового сплава VT-1 электронным пучком в вакууме // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2018. № 2–3. С. 55–63. Текст: непосредственный.
2. Lapina A. E., Smirnyagina N. N. Thermophysical model of electron beam boriding of titanium alloy VT-1 // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects. IEEE eXpress Conference Publishing. 2020. Pp. 675–678.
3. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В. Основы электронно-лучевой обработки материалов. Москва: Машиностроение, 1978. 239 с. Текст: непосредственный.
4. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий в системе Ti-B-Si-C, теплоперенос и синтез мах фаз на поверхности титанового сплава VT-1 при электронно-лучевой обработке в вакууме / Н. Н. Смирнягина, А. Е. Лапина, В. М. Халтанова, Д. Э. Дашеев // Инновационные технологии в науке и образовании: материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Улан-Удэ, 3–5 июля 2017 г.); ответственный редактор Е. Р. Урмакшинова, научный редактор С. Л. Буянтуев. Улан-Удэ: Изд-во Бурят. гос. ун-та, 2017. 200 с. Текст: непосредственный.
5. Thermodynamic modelling of phase equilibrium in system Ti-B-Si-C, synthesis and phases composition of borides and carbides layers on titanic alloy VT-1 at electron beam treatment in vacuum / N. N. Smirnyagina, V. M. Khaltanova, A. E. Lapina, D. E. Dasheev // IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 168. XII International Conference Radiation-thermal Effects and Processes in Inorganic Materials (4–12 September, 2016). Tomsk, 2016. Pp. 1–6.

SIMULATION OF ELECTRON BEAM TREATMENT
USING THE SOMSOL MULTIPHYSICS SOFTWARE PACKAGE

Anna E. Lapina

Senior Lecture,
Department of Computer Science and Informatics,
Dorzhi Banzarov Buryat State University
24a Smolina St., Ulan-Ude 670000, Russia
E-mail: ann_lapina@mail.ru

Nataliya N. Smirnyagina

Dr. Sci. (Engineering), A/Prof.,
East Siberian State University of Technology and Management
40v Klyuchevskaya St., Ulan-Ude 670013, Russia
E-mail: smirnyagina09@mail.ru

Abstract. The article presents the results of three-dimensional modeling of the electron beam exposure process on the sample surface using the Comsol Multiphysics software complex. The temperature distribution over the surface and deep into the sample in the direction of the electron beam motion during the heating and cooling stage was obtained. Features of the introduction of intensive focused electron beam into metal alloys have been investigated. Calculations of heating and cooling rates in the electron beam exposure zone are presented. The obtained numerical results made it possible to investigate the patterns of the distribution of temperatures and its rates of change from the action of an electron beam.

Keywords: mathematical modeling, thermal processes, a titanium alloy VT-1, electron beam processing, the high-concentrated energy streams, the electron beam