УДК 536.8
doi 10.18101/978–5–9793–0803–6–117–122

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ СФОКУСИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

© ***Полуконова Анна Евгеньевна,*** аспирант
Института физического материаловедения СО РАН
Россия, г. Улан-Удэ
E-mail: anna2-11-90@mail.ru

© ***Смирнягина Наталья Назаровна,*** доктор технических наук, доцент
Института физического материаловедения СО РАН
Россия, г. Улан-Удэ
E-mail: smirnyagina09@mail.ru

© ***Дашеев Доржо Эрдэмович,*** научный сотрудник
Института физического материаловедения СО РАН
Россия, г. Улан-Удэ
E-mail: fokter@mail.ru

В статье рассматриваются этапы построения математической модели тепловых полей, возникающих в образце в ходе электронно-лучевой обработки. Были проанализированы вопросы и особенности взаимодействия электронного пучка с веществом (тепловые процессы в зоне обработки) и материалами.
Изучены вопросы моделирования теплопередачи при обработке металлов и сплавов высококонцентрированными источниками энергии. Расчет температур и графики распределения температурных полей производились с помощью математической среды Maple (18.0). Воздействие электронным пучком проводилось с помощью мощной электронно-лучевой установки с аксиальной пушкой на термокатодах.
Разработана математическая модель теплового воздействия высококонцентрированными потоками энергии на низкоуглеродистые стали СТ-3 в условиях электронно-лучевой обработки в рамках теории теплопроводности.
Полученные численные результаты позволили исследовать закономерности распределения температуры и ее изменения в зависимости от действия сфокусированного электронного пучка.
Ключевые слова: компьютерное моделирование, тепловые процессы, электронно-лучевая обработка, высококонцентрированные потоки энергии, низкоуглеродистые стали, электронный пучок, область максимального энерговыделения.

MODELLING OF HEAT PROCESSES IN ELECTRON BEAM PROCESSING OF LOW-CARBON STEEL BY FOCUSED ELECTRON BEAM

Anna E. Polukonova, Postgraduate Student, Institute of Physical Material Science,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Ulan-Ude, Russia

Natalia N. Smirniagina, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,
Institute of Physical Material Science,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Ulan-Ude, Russia

Dorzho E. Dasheev, Research Associate, Institute of Physical Material Science,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Ulan-Ude, Russia

The article studies the stages of creating the mathematical model of thermal fields arising in a sample during electron beam processing. The questions of interacting an electron beam with the substance (thermal processes in a processing zone), features of interaction of an electron beam with materials are considered.
Questions of modeling of a heat transfer when processing metals and alloys by high-concentrated power sources are considered. Calculation of temperatures and graphics of distribution, temperature fields were made by means of the mathematical Maple (18.0) environment. Influence by an electron beam was carried out by means of powerful electron beam installation with an axial gun on thermo cathodes.
The mathematical model of thermal influence by the high-concentrated energy streams on low-carbon steel ST-3 in the conditions of electron beam processing (in Maple 18) within the theory of heat conductivity has been developed.
The received numerical results allowed investigating the regularities of temperature distribution and its change depending on the action of the focused electron beam.
Keywords: computer modeling, thermal processes, electron beam processing, the high-concentrated energy streams, low-carbon steel, electron beam, the region of maximum energy release.

Введение

Получение изделий с оптимизированными под заданные условия функционирования свойствами и структурой является актуальной задачей современных производств. Обработка с помощью концентрированных потоков энергии, под действием которых формируется локально и глобально неоднородная структура тела, относится к перспективному направлению в данной отрасли. Использование электронного пучка как источника нагрева позволяет значительно расширить возможности поверхностной модификации сплавов и металлов.

При анализе теплового воздействия высококонцентрированными источниками энергии часто вводятся те или иные допущения (одно- или двумерная постановка, постоянные коэффициенты и т. д.), упрощающие вид уравнения теплопроводности. Это снижает эффективность учета и описания, присущих действию концентрированного потока энергии (КПЭ), особенностей, таких как высокие скорости процессов, фазовые превращения, структурная неоднородность.

В статье рассматриваются этапы построения математической модели тепловых полей, возникающих в образце в ходе электронно-лучевой обработки.

Постановка задачи. Особенности исследования

Решение любой задачи следует начинать с анализа исходных данных и выбора методики расчета.

Физическая модель процесса электронно-лучевой обработки высококонцентрированными источниками энергии определяется целым рядом параметров:

а) мощностью воздействия электронного пучка — P [Вт];

б) скоростью обработки детали — $V_{обр}$ [м/с];

в) временем воздействия — t [с].

Учитываются данные по размерам детали — d*1 (15*7 мм) (диаметр и высота образца), глубине проникновения электронов в образец — $S = 2{,}1 \cdot 10^{-12} U^2/p$, глубине максимального энерговыделения — h = 0,75S [м].

Следующим важным этапом расчета является анализ теплофизических характеристик конкретного материала. Основные теплофизические свойства материала взяты из справочника [2]: теплопроводность — [Вт/м*К], теплоемкость — c_p [Дж/кг*^{0}С], плотность — ρ_m [кг/м^3] и температуропроводность α [м/с^2], которая связана с предыдущими параметрами формулой

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_\rho \cdot \rho_m}.$$

Результаты и их обсуждение

Для моделирования процесса электронно-лучевой обработки выбраны образцы, имеющие форму, представленную на рисунке 1. По условиям электронно-лучевой обработки электронный пучок вначале фокусируется на поверхности цилиндрического образца, а затем с помощью блока управления электронным пучком преобразуется в растр и сканируется по всему диаметру.

Таким образом, можно представить, что в окружность вписывается квадрат.

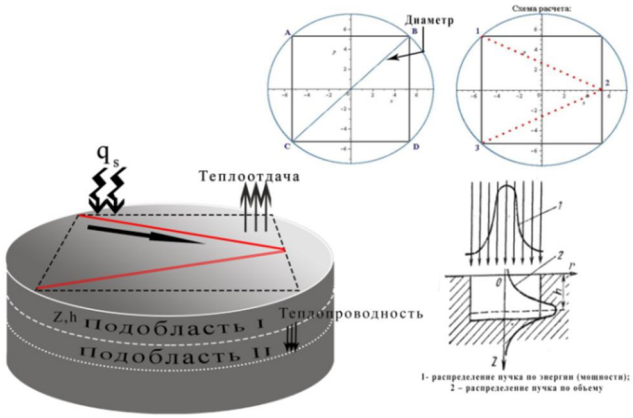

Рис. 1. Расчетная схема теплового воздействия электронного пучка

Распределение плотности тока по сечению луча близко к закону Гаусса, а распределение энергии по глубине пробега электронного пучка имеет максимум. Тепловой источник при электронно-лучевом воздействии на металлы можно представить в виде нормально распределенного по поверхности и объему с максимумом под поверхностью нагреваемого тела.

При расчете определяли следующие величины: температура T(0, t) на поверхности детали, температура T(x, t) на глубине максимального энерговыделения — x (или z), необходимая мощность для достижения требуемых результатов обработки и ряд других параметров [3].

Обработка объемным (электронный пучок) быстродвижущимся точечным источником

На рисунке 2 представлена временная зависимость роста температур для стали СТ-3 в области максимального энерговыделения, на рисунке 3 — распределение температуры на стадии нагрева по глубине проникновения и расстоянию от центра образца, на рисунке 4 — зависимость распределения температур по поверхности от расстояния x и y.

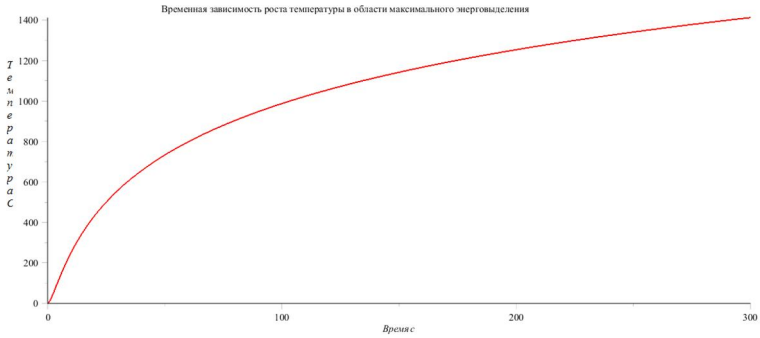

Рис. 2. Временная зависимость роста температуры для стали СТ-3 в области максимального энерговыделения

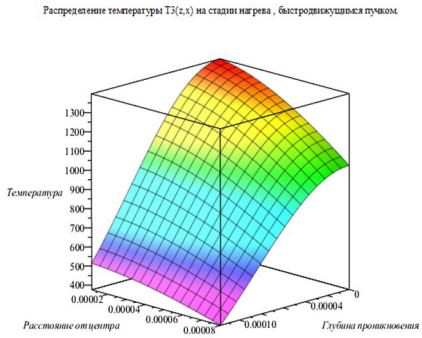

Рис. 3. Распределение температуры на стадии нагрева по глубине проникновения и расстоянию от центра образца

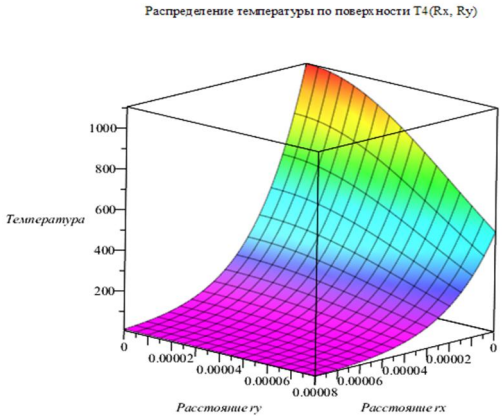

Рис. 4. Распределение температуры по поверхности
от расстояния x и y

Тепловые поля по глубине проникновения электронного пучка

При введении электронного пучка диаметром 1,0 мм в течение 1 с в центр цилиндрического образца в точке его встречи на глубину Z достигается максимальная температура.

Электронный пучок вначале фокусируется на поверхности цилиндрического образца, он затем с помощью блока управления электрический пучок преобразуется в растр, и образец сканируется по всему диаметру.

Расчеты выполнены с шагом 1 мкм вглубь и по поверхности относительно центра цилиндрического образца.

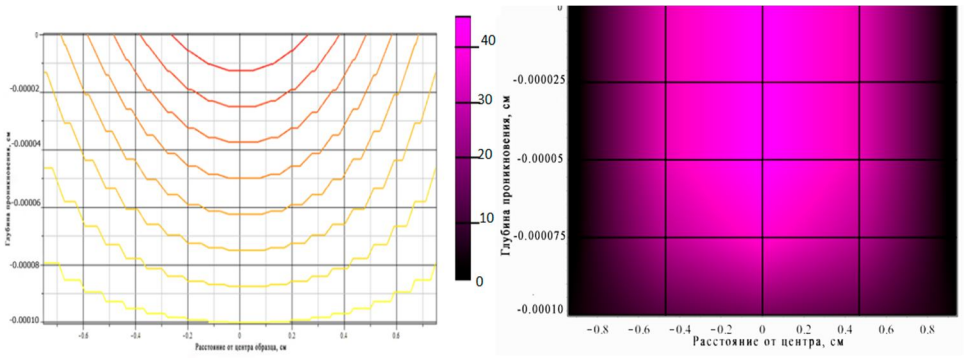

Рис. 5. Распределение температур

Выводы

Проведено исследование особенностей ввода интенсивного сфокусированного электронного пучка в стали СТ-3. Рассмотрены особенности взаимодействия электронного пучка с материалами, вопросы моделирования теплопередачи при обработке металлов и сплавов высококонцентрированными источниками энергии. Исследованы закономерности распределения температуры и скорости ее изменения от действия сфокусированного электронного пучка.

Разработана математическая модель теплового воздействия высококонцентрированными потоками энергии на низкоуглеродистые стали СТ-3 в условиях электронно-лучевой обработки (в среде Maple 18.0) в рамках теории теплопроводности.

Литература

1. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.
2. Марочник сталей и сплавов: справочник / под ред. В. Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
3. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.