

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МЕТАЛЛАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Ю. В. Мартинович

Белорусский государственный университет, Минск;

yuliya_martinovich@mail.ru;

науч. рук. – Н. Н. Черенда, канд. физ.-мат. наук, доц.

Представлены результаты решения нестационарного уравнения теплопроводности для моделирования воздействия плазменных потоков на медь и железо. Проводится сравнение рассчитанной толщины расплавленного слоя с экспериментально полученными данными.

Ключевые слова: теплопроводность; медь; железо; плазменные потоки; плавление.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка материалов плазмой широко используется для создания покрытий и модификации свойств материалов. Одним из видов плазменных потоков являются компрессионные плазменные потоки, генерируемые квазистационарными плазменными ускорителями [1]. Из-за малого времени обработки (сотни микросекунд), подводимая к поверхности энергия не успевает отводиться вглубь материала и концентрируется в тонком поверхностном слое, тем самым, обеспечивая его плавление и высокую скорость охлаждения после окончания воздействия. Поскольку структурно-фазовое состояние поверхностного слоя материала и, как следствие, его свойства зависят от условий нагрева и охлаждения, актуальной является задача моделирования тепловых полей в поверхностном слое материала при импульсном плазменном воздействии.

Как известно, существует три механизма передачи тепла – излучение, конвекция и теплопроводность. В данной работе с помощью метода конечных элементов на основе платформы COMSOL Multiphysics 5.3 решалось нестационарное уравнение теплопроводности для нахождения температурных полей в меди и железе, подвергающихся обработке плазменными потоками, которые в уравнении теплопроводности фигурировали как внешний источник.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Используемое уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + (\vec{u} \cdot \nabla) T = -(\nabla \cdot \vec{q}) + Q, \quad (1)$$

где ρ – плотность, C_p – теплоемкость при постоянном давлении, T – температура, t – время, $\vec{u}$ – скорость движения межфазной границы, ∇ – оператор Набла, q – тепловой поток, Q – поток внешнего источника. В данной работе процесс фазового перехода моделировался без использования метода движения межфазной границы, поэтому полагалось $(\vec{u} \cdot \nabla)T = 0$.

Начальные условия содержат распределение температуры в образце в начальный момент времени $T_0 = 300\text{K}$. Граничные условия были представлены заданием теплового потока на одной из границ образца в любой момент времени.

В качестве ориентировочных входных данных величины внешнего теплового потока использовалась следующая формула [2], в которой дополнительно было введено нормирование на плотность теплового потока:

$$T_{\max} = T_0 + 2\sqrt{\frac{\tau}{\pi c D}} W, \quad (2)$$

где $T_0 = 300\text{K}$ – начальная температура, $T_{\max}$ – температура плавления (для железа – 1810 К, для меди – 1357 К, так как целью работы было достигнуть точки фазового перехода), c – теплоемкость, τ – время обработки, равное 100 мкс, D – коэффициент теплопроводности, W – значение плотности теплового потока, необходимое для того, чтоб температура образца в рассматриваемой точке изменила свое значение от T_0 до $T_{\max}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице представлены значения плотности теплового потока, полученные с помощью формулы (2) и значения, подобранные в COMSOL Multiphysics, чтобы достигнуть точки плавления.

Таблица

Расчетные и подобранные значения плотности потока

Значение потока	Железо	Медь
Расчетное, ГВт/м ²	2,3	3,5
Подобранное, ГВт/м ²	2,0	3,8

Достижение температуры плавления оценивалось для точки, находящейся на поверхности образца. Как видно из таблицы, наблюдается соответствие значений, полученных различными методами.

Далее варьировались значения плотности теплового потока от внешнего источника, и решалось стационарное уравнение теплопроводности для моделирования охлаждения в течение 500 мкс. Результаты модели-

рования представлены на рис. 1-2. Для железа максимальная скорость охлаждения составила $-339,9 \frac{K}{\text{мкс}}$, для меди $-792,5 \frac{K}{\text{мкс}}$.

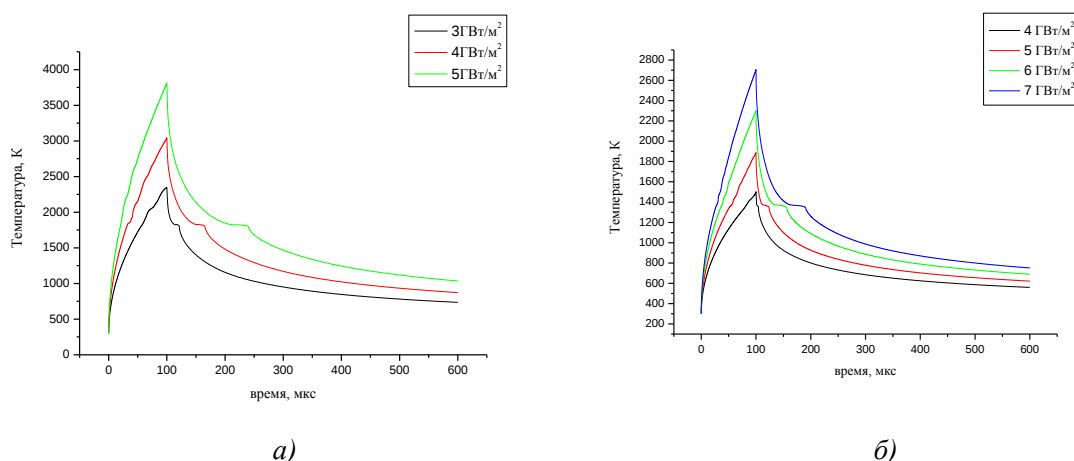


Рис. 1. График зависимости температуры от времени:

- а) для железа, обработанного с различной плотностью теплового потока;
б) для меди, обработанной с различной плотностью теплового потока

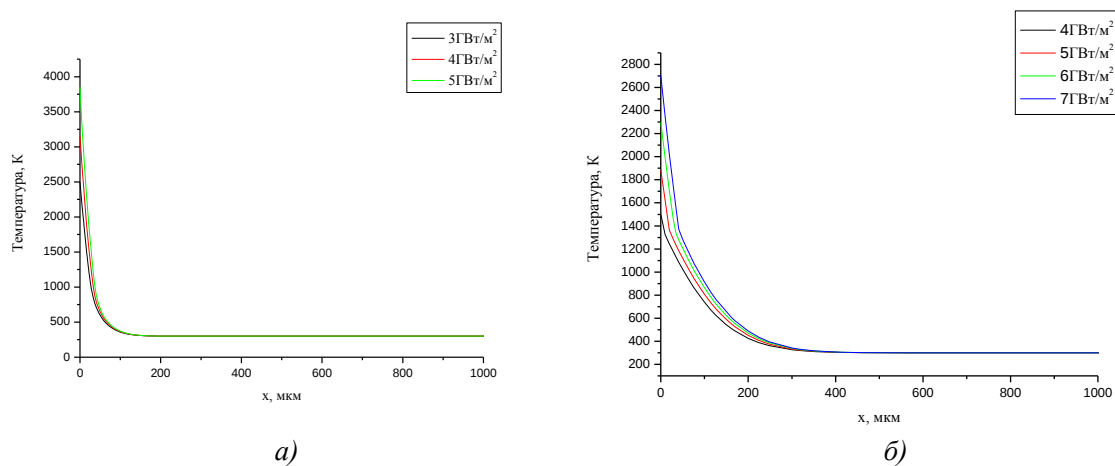


Рис. 2. График зависимости температуры от расстояния от поверхности:

- а) для железа, обработанного с различной плотностью теплового потока;
б) для меди, обработанной с различной плотностью теплового потока

На рисунке 3 приведено сравнение толщин расплавленного слоя, полученных в результате моделирования и экспериментальных исследований (методом растровой электронной микроскопии).

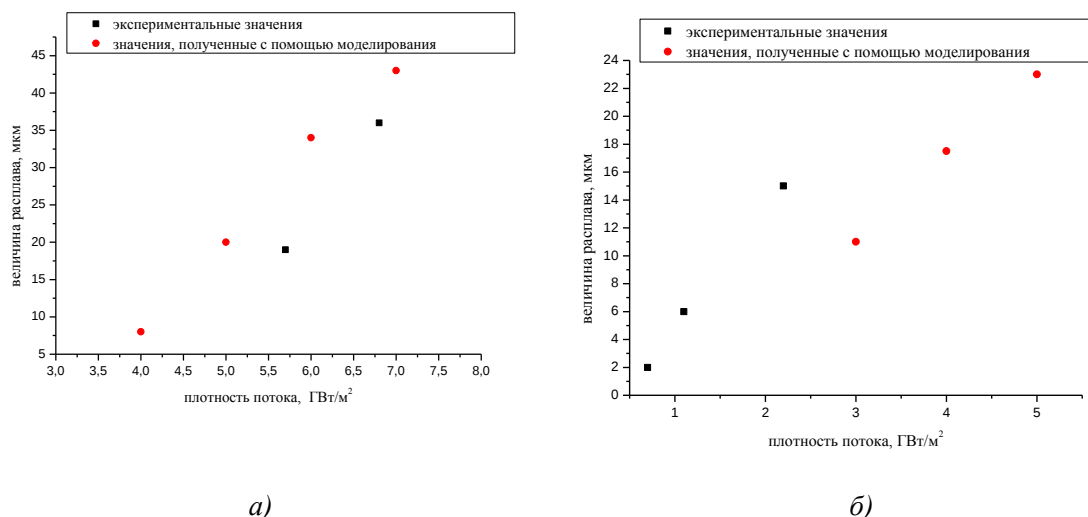


Рис. 3. Зависимость толщины расплава от плотности теплового потока;
а) в меди; б) в железе

Как видно, полученные значения имеют один порядок. Различие между рассчитанными и экспериментальными значениями может быть связано с тем, что при моделировании не учитывались зависимости тепловых характеристик от параметров микроструктуры и зависимости рассматриваемых в уравнении теплопроводности характеристик от температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численного моделирования в COMSOL Multiphysics тепловых полей, возникающих в меди и железе при воздействии компрессионных плазменных потоков, была проведена оценка мощности теплового потока, необходимого для плавления материала мишени, а также максимальной скорости охлаждения поверхностного слоя после окончания действия импульса. Рассчитанные толщины расплавленного слоя по порядку величины соответствуют экспериментально определенным значениям.

Библиографические ссылки

1. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками» / В. В. Углов [и др.]. Мн., 2013.
2. Theoretical investigation of crack formation in tungsten after heat loads / A. S. Arakcheev [et. al.] // Journal of Nuclear Materials. 2015. Vol. 453. P. 246–249.