УДК 669.295-15:621.7.072

$C.\Gamma.$ Молотков¹, Л.П. Бащенко², Е.А. Будовских², В.Е. Громов²

¹ Кузбасская государственная педагогическая академия ² Сибирский государственный индустриальный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОМ ЛЕГИРОВАНИИ С УЧЕТОМ ФОРМЫ ТЕПЛОВОГО ИМПУЛЬСА*

Аннотация. Проведено моделирование нагрева поверхности металлов и сплавов при обработке импульсной многофазной плазменной струей, сформированной из продуктов электрического взрыва проводников. Глубину зоны оплавления определяли при двух формах импульса — прямоугольном и бимодальном, который соответствует структуре струи, включающей быстрый плазменный фронт и относительно медленный тыл, содержащий конденсированные частицы продуктов взрыва. Сравнение результатов моделирования показало, что форма импульса незначительно сказывается на глубине зоны легирования.

Ключевые слова: импульсные многофазные плазменные струи, электровзрывное легирование, нагрев поверхности, металлы и сплавы, глубина зоны оплавления, форма импульса.

MODELING OF HEATING THE METAL SURFACE DURING ELECTROEXPLOSIVE ALLOYING WITH DIFFERENT SHAPE OF THE HEAT PULSE

Abstract. The simulation of the heating of the surface of metals and alloys during the treatment by multi-phase pulsed plasma jet formed from the products of explosion of electrical conductors is held. The depth of the melting zone was determined for the two pulse shapes – rectangular, and bimodal, which corresponds to the structure of the jet, including rapid plasma front and relatively slow rear containing condensed particles of the explosion products. Comparison of the simulation results showed that the pulse shape has little effect on the depth of the alloying zone.

Keywords: multi-phase pulsed plasma jet, electroexplosive alloying, heating of the surface, metals and alloys, depth of the zone melting, pulse shape.

В последние годы получили развитие методы упрочнения металлов и сплавов, основанные на использовании концентрированных потоков энергии. К ним, в частности, относятся электровзрывное легирование (ЭВЛ), которое позволяет проводить локальное упрочнение поверхности в местах ее наибольшего разрушения при эксплуатации и увеличивать функциональные свойства в несколько раз [1]. Суть ЭВЛ состоит в модификации структурнофазовых состояний при плавлении и насыщении поверхностных слоев металлов продуктами электрического взрыва проводников с последующей самозакалкой. При осуществлении ЭВЛ тепловым источником, как и источником легирующих элементов, является многофазная плазменная струя, которая всегда содержит частицы конденсированной фазы продуктов взрыва проводников (металлической фольги, углеродных волокон и др.).

При формировании струи конденсированные частицы отстают от плазменного компонента, поэтому можно говорить о ее строении, выделяя высокоскоростной плазменный фронт и относительно медленный тыл, содержащий конденсированные частицы. По имеющимся в литературе оценкам [1] скорости плазменного фронта и конденсированных частиц тыла струи составляют величину порядка 10 и 1 км/с соответственно. В связи с этим импульс теплового воздействия на поверхность при ЭВЛ

Целью настоящей работы является разработка модели расчета толщины зоны легирования с учетом формы импульса.

Предложенная модель содержит следующие упро-

- 1. В модели не учитываются энергия теплового излучения с облучаемой поверхности, энергия экзотермической реакции продуктов взрыва проводника с элементами материала основы и выделение скрытой теплоты плавления при кристаллизации зоны легирования; их суммарный тепловой эффект считается равным нулю.
- 2. Толщина зоны легирования много меньше ее диаметра, поэтому считается, что плазменная струя, служащая инструментом воздействия на поверхность, может рассматриваться как плоский тепловой источник.

Для того, чтобы оценить время процесса, определяющее толщину зоны легирования, необходимо знать зависимость температуры T от координаты x, отсчитываемой от поверхности в глубь слоя, и от времени t, а также от величины и формы импульса плотности мощности, падающего на поверхность. Для решения поставленной задачи запишем уравнение теплопроводности

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} - a \frac{\partial^2}{\partial x^2}\right) T = 0 \tag{1}$$

является как минимум двумодальным. Ранее при анализе результатов ЭВЛ эта особенность не учитывалась.

^{*} Работа выполнена при поддержке госзадания Минобрнауки РФ № 2.4807.2011.

с граничным условием второго рода для плотности мощности и начальным условием для температуры в виле

$$q(t) = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \bigg|_{x=0}, \ T(x,0) = 300 \ K, \tag{2}$$

где $a = \lambda/c\rho$ — температуропроводность; λ — коэффициент теплопроводности; c — удельная теплоемкость; ρ — плотность.

Решение одномерного уравнения (1) с условиями (2) для полубесконечной среды $0 \le x < \infty$ может быть записано [2] в следующем виде:

$$T(x,t) = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_{0}^{t} \frac{q(t-\xi)}{\sqrt{\xi}} \exp\left(-\frac{x^{2}}{4a\xi}\right) d\xi. \quad (3)$$

Рассмотрим решение (3) уравнений (1, 2) в частных случаях.

1. Пусть плотность мощности имеет вид прямоугольных импульсов:

$$q(t) = q_{\text{max}} [H(t) - H(t - \tau)],$$

где ступенчатая функция Хевисайда определяется

$$H(x) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t \ge 0; \end{cases}$$

здесь τ = 100 мкс – характерное время обработки (время импульса); $q_{\rm max}$ – максимальная плотность мощности на оси струи.

В расчетах использованы следующие параметры для титана [3]: $\lambda = 24~{\rm BT/(m\cdot K)};~c = 700~{\rm Дж/(кr\cdot K)};$ $\rho = 4320~{\rm kr/m^3};$ температура плавления $T_{\rm пл} = 1944~{\rm K}.$ На рис. 1, a-e показано поле температуры в зависимости от координаты и времени для различных максимальных значений плотности мощности $(1, 2~{\rm u}~3~{\rm FBr/m^2}).$ На рис. 1, z-e показана плоскость, соответствующая температуре $T_{\rm пл}$ (светлым цветом на этой плоскости нанесено поле температуры основы, превышающей температуру плавления).

2. Пусть плотность мощности имеет двумодальный вид

$$q(t) = q_1(t) + q_2(t);$$

$$q_1(t) = E_{S1} \exp\left[\left(-\frac{t - A}{B}\right)^2\right];$$

$$q_2(t) = E_{S2} \exp\left[\left(-\frac{t - C}{D}\right)^2\right],$$
(4)

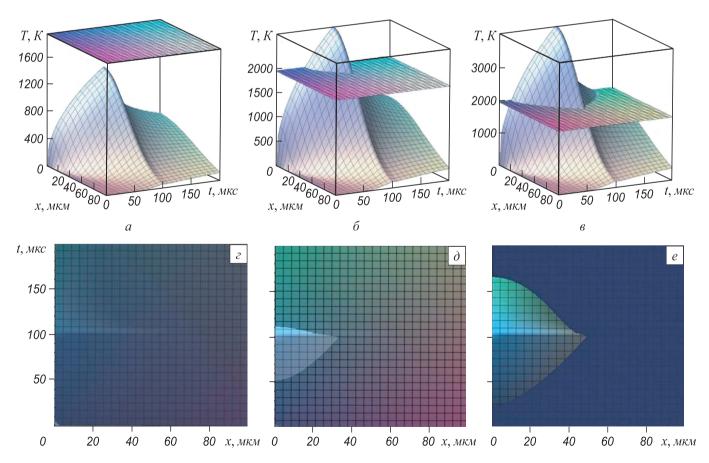


Рис. 1. Поле температуры T в зависимости от координаты x и от времени t (a-e) и поле температур, превышающих температуру плавления титана (z-e), для различных значений q_{\max} : $a-q_{\max}=10^9 \text{ Br/m}^2; \ \delta-q_{\max}=2\cdot 10^9 \text{ Br/m}^2; \ \delta-q_{\max}=3\cdot 10^9 \text{ Br/m}^2$

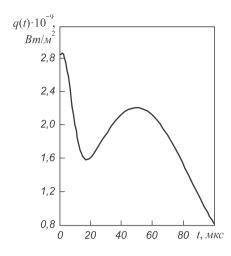


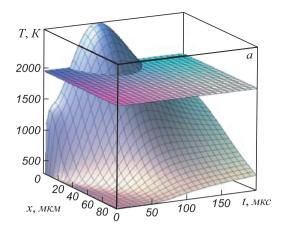
Рис. 2. Зависимость плотности потока энергии, рассчитанная по формуле (4)

где $A=10^{-7}$ с, $B=10^{-6}$ с, $C=5\cdot 10^{-5}$ с, $D=5,1\cdot 10^{-6}$ с, $E_{S1}=1,9\cdot 10^9$ Вт/м², $E_{S2}=2,2\cdot 10^9$ Вт/м² – параметры. График плотности мощности при таких параме-

График плотности мощности при таких параметрах показан на рис. 2. На рис. 3 приведены поле температуры в зависимости от координаты и от времени и плоскость, соответствующая температуре плавления титана (светлым цветом на этой плоскости нанесено поле температуры, превышающей температуру плавления).

Из сопоставления приведенных на рис. 1, ∂ и 3, δ результатов расчетов следует, что глубина зоны легирования титана практически не зависит от формы импульса теплового воздействия. Действительно, примерно одинаковая по времени и координате величина температуры, превышающая температуру облучаемой поверхности, достигается при одинаковых значениях плотности мощности и времени импульса.

Выводы. Представление зависимости плотности мощности от времени в виде прямоугольного импульса для многофазной плазменной струи продуктов электрического взрыва проводника при электровзрывном легировании является вполне обоснованным и упрощающим анализ предположением.



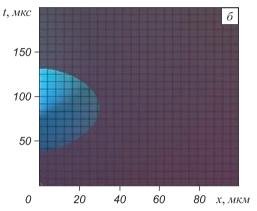


Рис. 3. Поле температуры в зависимости от координаты и от времени (a) и поле температур, превышающих температуру плавления титана (δ)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. – 301 с.
- Карлслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел.
 - М.: Наука, 1964. 488 с.
- Свойства элементов. Справочник / Под ред. М.Е. Дрица. М.: Металлургия, 1984. – 671 с.

© 2013 г. *С.Г. Молотков, Л.П. Бащенко, Е.А. Будовских, В.Е. Громов* Поступила 10 апреля 2013 г.