

УДК 544.654.2:621.373.8

АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ОСАЖДЕНИИ В ПРОЦЕССЕ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Н. Н. ФЕДОСЕНКО, кандидат технических наук, доцент

Н. А. АЛЕШКЕВИЧ, кандидат физико-математических наук, доцент

В. Г. ШОЛОХ, кандидат физико-математических наук, доцент

А. Н. КУПО

Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», г. Гомель, Республика Беларусь

Рассмотрен механизм взаимодействия лазерного излучения инфракрасного диапазона с металлами в процессе лазерного электрохимического осаждения серебра на медные подложки, исследованы процессы термической активации и динамика формирования температурных полей в зоне воздействия лазерного излучения при гауссовом распределении энергии в лазерном луче.

Ключевые слова: лазерная стимуляция, энергия активации, металлические покрытия, скин-слой, тепловой источник, температурное поле

Введение

Стимуляция процесса электрохимического формирования металлических покрытий лазерным излучением позволяет, наряду с увеличением скорости осаждения металлов, улучшить функциональные свойства покрытий и добиться экономии материалов, в том числе для изготовления изделий аварийно-спасательного назначения.

Основным фактором ускорения процесса осаждения является термическая активация всех составляющих его элементарных актов. Поскольку энергия активации различных стадий электрохимического осаждения, какими являются диффузия ионов металла к границе раздела электролит-подложка, восстановление металла, формирование металлического слоя, различны, то влияние лазерного излучения на процесс ускорения приводит к изменению кинетики сложного механизма образования электрохимического покрытия. Поэтому исследование динамики температуры в зоне термического воздействия, выяснение пространственно-временного распределения температуры в его окрестности являются важными задачами теории и практики лазерной гальванотехники.

Основная часть

Процесс нагрева металлической мишени излучением определяется следующими основными параметрами: во-первых, теплофизическими свойствами мишени и ее геометрией, во-вторых, оптическими свойствами металла и электролита и, наконец, режимом облучения.

Нами проанализирован механизм взаимодействия лазерного излучения инфракрасного диапазона с металлами в процессе лазерного электрохимического осаждения

олова и серебра на медные подложки. В работе использовалось лазерное излучение с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм, плотностью мощности $W \sim 10^6$ Вт/см². Лазерный источник работал в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов $f = 5$ Гц и длительностью импульса $\tau_p = 4 \cdot 10^{-3}$ с.

Показано, что толщина скин-слоя δ для рассматриваемых металлов составляет величину порядка 10^{-8} м. Расстояние, на которое за время действия лазерного импульса распространяется тепловое поле (длина тепловой волны l_t), определяется по формуле

$$l_t = \sqrt{\chi \tau_p}$$

и составляет для меди, серебра и олова следующие величины: $l_t(Cu) \approx 1,3 \cdot 10^{-3}$ м; $l_t(Ag) \approx 1,4 \cdot 10^{-3}$ м; $l_t(Sn) \approx 0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Поскольку $\delta \ll l_t$ то это означает, что лазерное излучение, поглощенное металлом, создает в нем поверхностный тепловой источник.

В начальный момент времени тепловая волна формируется и распространяется в медной подложке. Выбор модели, используемой для описания распространения теплового поля в металлической подложке, определяется соотношением толщины подложки h и длины тепловой волны l_t . В нашем эксперименте в качестве подложек использовались медные пластинки толщиной $h = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м, поэтому при анализе температурных полей необходимо использовать модель термически тонкой пластины. В свою очередь, в рамках этой модели различаются приближение большого пятна облучения, при котором имеет место соотношение $D_s \gg l_t$ и приближение малого пятна облучения, при котором справедливо условие $D_s \ll l_t$ (D_s – диаметр лазерного пятна на поверхности катода). По истечении времени порядка одной минуты формируется локальный осадок с толщиной, превышающей толщину скин-слоя, т.е. тепловой источник формируется в слое осаждаемого металла. При этом условия распространения теплового поля соответствуют модели металлической пленки на металлической подложке.

Нами проведены расчеты динамики температуры, создаваемой тепловым источником в зоне действия лазерного излучения. Для гауссового распределения энергии в лазерном луче расчет проводился на основе формулы [2].

Здесь I_0 – интенсивность лазерного излучения; A – коэффициент поглощения лазерного излучения материалом катода; k_t , p , c – коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость меди, h – толщина пластинки. Результат расчета представлен на рисунке 1.

Анализ формулы (1) показывает, что за время длительности лазерного импульса $t = \tau_p$ температура поверхности медной подложки практически стабилизируется и при интенсивности лазерного излучения $I_0 \sim 10^6$ Вт/см² достигает значения, соответствующего температуре плавления меди.

Актуальной с практической точки зрения задачей является анализ температурных полей в пластинке толщиной h , являющейся катодом при лазерном электрохимическом осаждении. Условия распространения теплового поля в нашем эксперименте соответствуют модели термически тонкой пластинки, приближению малого пятна [2]. В случае термически тонкой пластины, существенными становятся тепловые потери, обусловленные конвекцией. А в приближении малого пятна важным фактором являются радиальные потери энергии в пластинке.

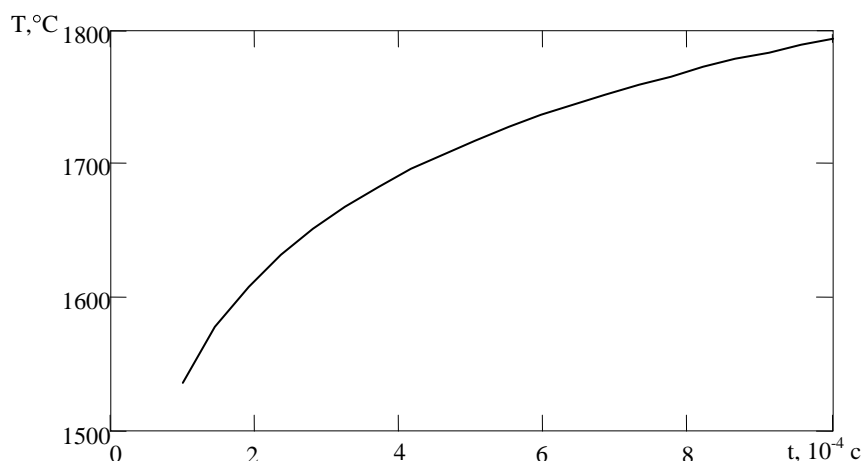


Рисунок 1 – Динамика нарастания температуры на медной подложке в зоне действия лазерного излучения

$$T(t) = \frac{\sqrt{\pi} \cdot A \cdot I_0 \cdot R_s}{4 \cdot k_t} \left\{ 1 + \frac{2 \cdot R_s}{\sqrt{\pi} \cdot h} \left[\ln \left(\frac{k_t \cdot t}{c \cdot \rho \cdot h^2} \right) + 0,6 \right] \right\}. \quad (1)$$

При анализе лазерного электрохимического осаждения металлов важным фактором, влияющим на кинетику физико-химических процессов, является теплообмен с электролитом. Поэтому при исследовании механизма лазерного электрохимического осаждения металлов на основе изучения тепловых полей актуальным является анализ влияния конвективного теплообмена на характер температурного поля на поверхности катода.

Нами проведен анализ температурного поля на поверхности медной подложки для гауссового распределения энергии в лазерном луче. При этом использовалось значение коэффициента конвективного теплообмена $\eta = 10^{-1}$ Вт/см² · град. [2]. Поскольку экспериментальные измерения позволяют определить температуру за пределами лазерного пятна, то особенно важными являются расчеты температуры для $r > R_s$, где R_s – радиус лазерного пятна. Распределение температуры за пределами лазерного пятна описывается формулой

$$T(r,t) = \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot A \cdot \exp(-\chi \cdot k_c^2 \cdot t) \cdot E_0 \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{4 \cdot \chi \cdot t}\right)}{4 \cdot \pi \cdot k_t \cdot h \cdot t} \right] \cdot \frac{1}{R_s^2 + \chi \cdot t} \cdot \exp\left(\frac{\left(\frac{r^2}{16 \cdot \chi^2 \cdot t^2}\right)^{-1}}{R_s^2 + \chi \cdot t}\right). \quad (2)$$

Здесь χ – коэффициент температуропроводности меди; E_0 – мгновенное значение лучистой энергии; $k_c^2 = 2\eta/k_t h$ – коэффициент, учитывающий теплообмен, временная координата t изменяется в пределах длительности импульса. На рисунке 2 представлено временное распределение температуры в пределах длительности лазерного импульса на расстоянии $r = 0,07$ см.

Как видно из этого рисунка, наличие конвективного теплообмена существенно снижает температуру в окрестности зоны термического воздействия, причем влияние этого фактора возрастает с течением времени. Кроме того, конвективный теплообмен

оказывает влияние и на радиальное распределение температуры в окрестности зоны термического воздействия. Результаты расчета радиального распределения температуры в окрестности лазерного пятна в результате воздействия одного импульса, проведенные в соответствии с формулой (3), показаны на рисунке 3.

$$T(r, \tau_p) = \frac{A \cdot I_0 \cdot \chi \cdot R_s^2}{k_t \cdot h} \int_0^{\tau_p} \frac{1}{4 \cdot \chi \cdot t + R_s^2} \cdot \exp \left[\left(\chi \cdot k_c^2 \cdot t \right) \cdot \frac{r^2}{4 \cdot \chi \cdot t} + \frac{r^2 \cdot R_s^2}{4 \cdot \chi \cdot t \cdot (\chi \cdot t + R_s^2)} \right] dt. \quad (3)$$

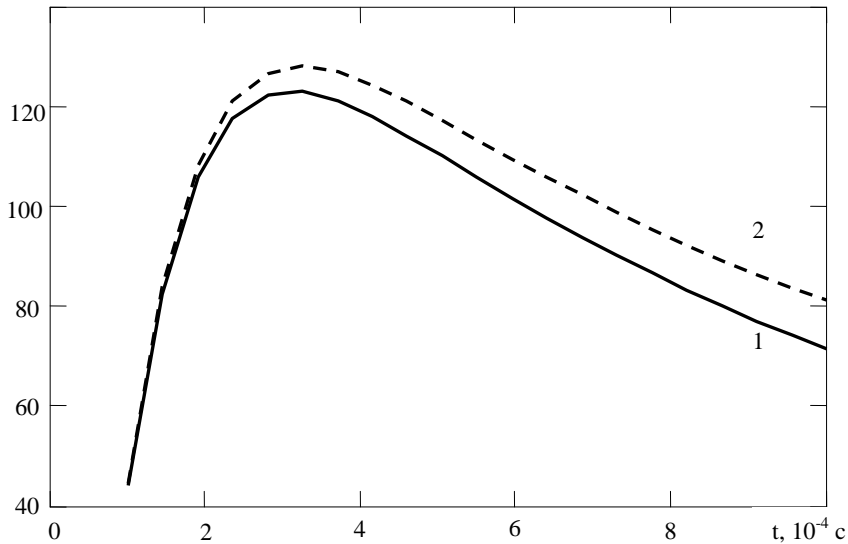


Рисунок 2 – Температурное поле на поверхности пластины для гауссового распределения энергии в лазерном пятне: 1 – с учетом конвективных потерь; 2 – без учёта конвективных потерь

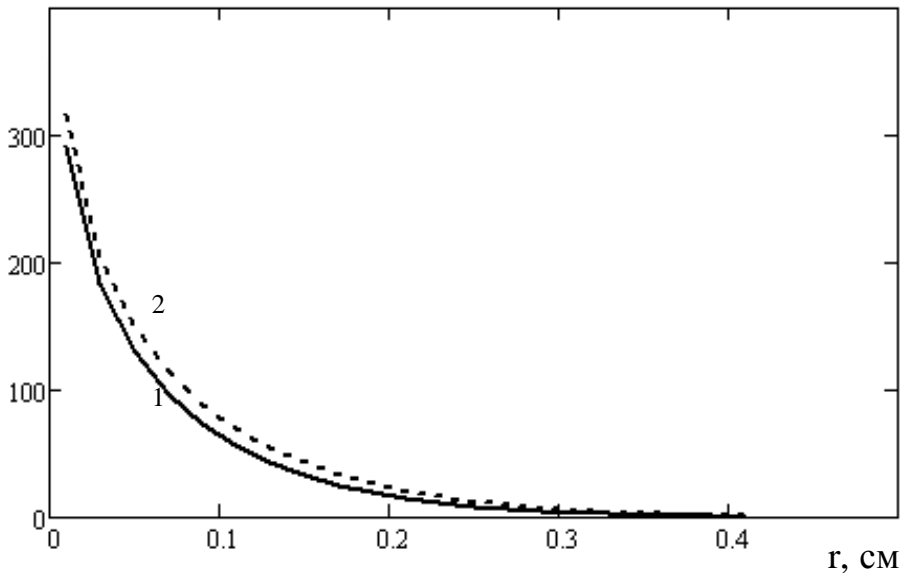


Рисунок 3 – Радиальное распределение температурного поля на поверхности медной пластины для гауссового распределения энергии на момент окончания лазерного импульса: 1 – с учётом конвективных потерь; 2 – без учёта конвективных потерь

Из рисунка 3 видно, что учет конвективного теплообмена особенно важен при анализе температурного поля в ближайшей окрестности зоны термического воздействия.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что процессы отвода тепловой энергии из зоны воздействия лазерного излучения вследствие теплопроводности и конвективного теплообмена с точки зрения физико-химической кинетики можно рассматривать как параллельные процессы.

Заключение

Таким образом, проанализирован механизм взаимодействия лазерного излучения инфракрасного диапазона с металлами в процессе лазерного электрохимического осаждения серебра на медные подложки. Показано, что лазерное излучение, поглощаемое слоем металла толщиной порядка 10^{-8} м, создает в металле поверхностный тепловой источник, при этом в начальный момент времени тепловая волна формируется и распространяется в медной подложке, а условия распространения соответствуют модели термически тонкой пластинки, приближению малого пятна. По истечении времени порядка одной минуты формируется локальный осадок серебра с толщиной, превышающей толщину скин-слоя, и тепловой источник формируется в слое осаждаемого металла, а условия распространения теплового поля соответствуют модели металлической пленки на металлической подложке.

Литература

1. Влияние лазерного излучения при локальном формировании тонких плёнок электрохимическим методом / А. А. Хмыль [и др.] // Журн. приклад. спектроскопии. – 1996. – Т. 63, № 3. – С. 506–509.
2. Взаимодействие лазерного излучения с веществом / А. М. Прохоров [и др.]. – Москва : Наука, 1988. – 537 с.

Поступила в редакцию 27.01.2011

N. Fedosenko, N. Aleshkevich, V. Sholoh, A. Kupo ANALYSIS OF TEMPERATURE FIELDS IN LASER ELECTROCHEMICAL DEPOSITION DURING MAKING OF RESCUE PRODUCTS

The mechanism of interaction of laser radiation of infrared range of metals during laser electrochemical deposition of silver on copper substrates is considered, the processes of thermal activation and the dynamics of the formation of temperature fields in the zone of laser radiation with a Gaussian distribution of energy in the laser beam are investigated.