ТЕПЛОПЕРЕНОС В ЭВТЕКТИЧЕСКОМ СИЛУМИНЕ, ПОДВЕРГНУТОМ ВОЗДЕЙСТВИЮ КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

Н.Н. Черенда[1)], Н.В. Бибик[1)], В.М. Асташинский[2)], А.М. Кузьмицкий[2)]
[1)]*Белорусский государственный университет,*
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь, Cherenda@bsu.by, Bibiknv@bsu.by
[2)]*Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,*
ул. П. Бровки 15, Минск 220072, Беларусь, ast@imaph.bas-net.by

Проведено численное моделирование процесса теплопереноса в приповерхностном слое силумина, подвергнутого плазменному воздействию, путем решения одномерного уравнения теплопроводности Фурье. Показано, что температура достигает максимального значения на поверхности образца в момент окончания импульса плазмы и падает с увеличением глубины. Толщина проплавленного слоя, получаемая при решении уравнения теплопроводности, оказывается больше глубины, определенной экспериментально, что объясняется процессами эрозии, протекающей в процессе плазменной обработки. Установлено, что учет слоя, удаленного в результате эрозии, приводит к согласованию экспериментально полученной глубины с данными, полученными при моделировании.

***Ключевые слова*:** компрессионные плазменные потоки; эвтектический силумин; температурные поля; эрозия.

HEAT TRANSFER IN EUTECTIC SILUMIN UNDER THE ACTION OF COMPRESSION PLASMA FLOWS

N.N. Cherenda[1)], N.V. Bibik[1)], V.M. Astashynski[2)], A.M. Kuzmitski[2)]
[1)]*Belarusian State University,*
4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, Cherenda@bsu.by, bibiknv@bsu.by
[2)]*A.V. Luikov Heat and mass transfer institute of National Academy of Science of Belarus,*
15 P. Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus, ast@imaph.bas-net.by

Numerical modeling of the heat transfer process in the near-surface layer of silumin, subjected to plasma action, was carried out by solving the one-dimensional Fourier heat equation. It was shown, that the temperature reaches the maximum value on the sample surface at the end of duration of plasma pulse and decreases with increasing depth. The maximum depth of the melted layer obtained by numerical calculations was 65μm at Q=35 J/cm^2. The depth of the melted layer observed by scanning electron microscopy in the sample, processed at the same energy, was 40μm. The difference in the experimentally obtained data and in numerical calculations was explained by the presence of the erosion, which has been taking place during plasma processing. It was found that an increase in the absorbed energy density leads to an increase in the remote mass. It has been established that taking into account the layer eroding leads to agreement between the experimentally obtained depth and the data obtained by numerical calculations.

Keywords: compression plasma flows; eutectic silumin; temperature fields; erosion.

Введение

Обработка компрессионными плазменными потоками (КПП) силуминов позволяет эффективно модифицировать свойства данных сплавов. В ранее проведенных исследованиях [1-2] показано, что воздействие импульсами высокоэнергетической плазмы приводит к формированию модифицированного слоя толщиной до 40 мкм, элементный состав и структура которого определяется энергетическими параметрами компрессионных плазменных потоков (КПП). В структуре данного слоя можно условно выделить подслои, образующихся вследствие неравномерности распределения температуры по глубине и различной температуры плавления структурных составляющих исследуемого сплава. Целью данной работы яв-

ляется определение распределения температуры по глубине силумина, подвергнутого воздействию КПП. Объектом исследования являлся сложнолегированный эвтектический силумин поршневой группы следующего состава: 83.4 ат.% Al, 12.6 ат.% Si; 0.5 ат.% Cu; 2.7 ат.% Mg; 0.3 ат.% Ni; 0.3 ат.% Fe; 0.2 ат.% Mn. Образцы обрабатывались тремя импульсами плазмы длительностью ~100мкс каждый. Плотность поглощенной энергии (Q) за один импульс изменялась в диапазоне 17-35 Дж/см^2 путем варьирования расстояния между катодом и образцом.

Результаты и их обсуждение

Определим распределение температуры по глубине в различные моменты времени (температурные поля) *T(x, t)* в приповерхностном слое силумина, подвергнутого воздействию КПП, исходя из того, что теплообмен осуществляется только за счет теплопроводности. При условии однородности плазменного потока и с учетом того, что размер образца меньше поперечного размера падающего потока и, соответственно, вся обрабатываемая поверхность образца нагревается равномерно, нахождение *T(x, t)* может быть осуществлено из решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье для одномерного температурного поля с отсутствующими внутренними источниками энергии в материале:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T(x,T)}{\partial x}\right) = c(T)\rho\frac{\partial T(x,T)}{\partial t}, \qquad (1)$$

где $\lambda(T)$ и $c(T)$– теплопроводность и теплоемкость, соответственно, зависящие от температуры, а ρ – плотность сплава. Введем следующие допущения: исследуемый силумин является изотропным, а теплопроводность и теплоемкость не зависят от температуры. В начальный момент времени температура образца равна температуре окружающей среды - 295 К (T_0). Следовательно, начальное условие для уравнения теплопроводности можно сформулировать в следующем виде:

$$T(x, 0)=T_0 \qquad (2)$$

Передача энергии от плазменного потока поверхностному слою образца происходит через ударно сжатый слой, формирующийся в приповерхностной области, в результате теплопроводности. При формулировании граничных условий для уравнения теплопроводности необходимо учитывать внешний поток энергии через переднюю стенку (x=0) и его отсутствие через противоположную стенку (x=h). Таким образом, граничные условия можно записать в следующем виде:

$$-\lambda\frac{\partial T(x,T)}{\partial x}\bigg|_{x=0} = \frac{Q}{\tau}, \qquad (3)$$
$$-\lambda\frac{\partial T(x,T)}{\partial x}\bigg|_{x=h} = 0.$$

где h – толщина образца

Решение уравнения (1) с начальными и граничными условиями (2)-(3) позволяет получить пространственное распределение температуры в направлении, нормальному обрабатываемой поверхности (по поперечному сечению), в любой момент времени. На рис. 1 представлено пространственное распределение температуры по глубине образца в момент окончания действия импульса плазмы (т.е. через 100 мкс).

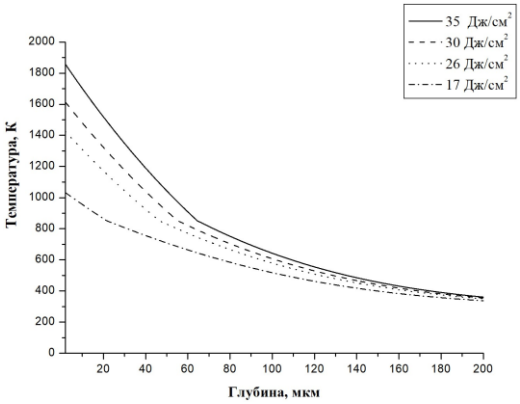

Рис. 1. Распределение температуры по глубине силумина через 100 мкс после начала действия импульса КПП при различном значении Q

В момент окончания импульса плазмы температура достигает максимального значения на поверхности и падает с увеличением глубины. Глубина проплавленного слоя, получаемая в результате расчетов, соотвествует экспериментальной глубине для образцов, обработанных при

небольшом значении Q, и превышает экспериментальную для образцов, обработанных при больших значениях Q в исследуемом энергетическом диапазоне. При максимальном значении Q=35 Дж/см^2 глубина составляет согласно моделированию 65 мкм, в то время как согласно данным исследований поперечного сечения с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) она составляет только 40 мкм. Это объясняется тем, что в процессе воздействия импульсами КПП происходит эрозия приповерхностного слоя силумина, которая приводит к уменьшению толщины модифицированного слоя. Согласно проведенным измерениям, величина удаленной массы с единицы площади возрастает при увеличении значения плотности поглощенной энергии по экспоненциальному закону (рис. 2). Основными механизмами эрозии при воздействии высоэнергетических потоков энергии являются поверхностное испарение и гидродинамический разлет вещества [3].

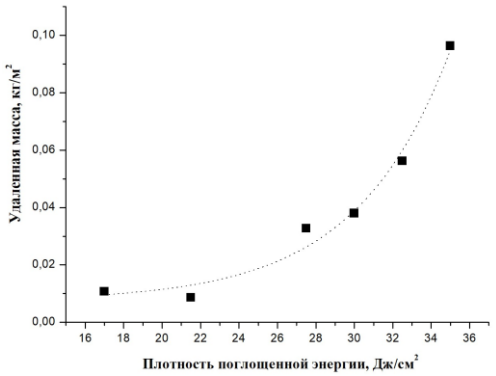

Рис. 2. Зависимость массы удаленной с единицы площади поверхности силумина от плотности поглощенной энергии Q

Увеличение плотности поглощенной энергии приводит к увеличению температуры обрабатываемого слоя, а также времени существования проплавленного слоя, что ведет к увеличению интенсивности протекания процесса эрозии приповерхностного слоя. Поскольку образцы представляют собой цилиндры известного диаметра, то по уносу массы можно определить толщину унесенного слоя ($h_{эр}$). На рис. 3 представлена зависимость глубины от энергии теоретическая ($h_{теор}$), полученная при решении уравнения теплопроводности, экспериментальная ($h_{эксп}$), полученная методом РЭМ, и экспериментальная, к которой прибавлена толщина слоя, удаленного в результате эрозии ($h_{эксп}$+ $h_{эр}$).

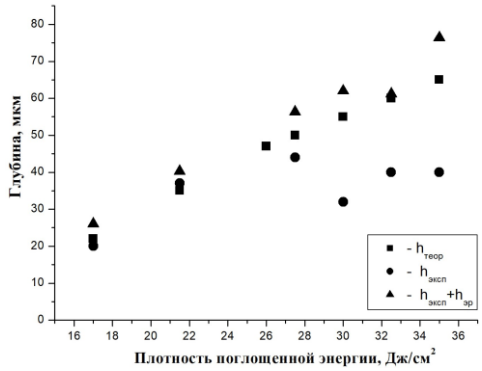

Рис. 3. Зависимость глубины модифицированного слоя от плотности поглощенной энергии Q, полученная численными расчетами и экспериментально

Таким образом установлено, что учет слоя, удаленного при эрозии, приводит к согласованию между экспериментально наблюдаемой глубиной и глубиной проплавленного слоя, полученного при решении уравнения теплопроводности Фурье.

Библиографические ссылки

1. Черенда Н.Н., Бибик Н.В., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. Модификация поверхностного слоя эвтектического силумина компрессионными плазменными потоками. *Физика и химия обработки материалов. Плазмохимические способы получения и обработки материалов* 2012; (3): 37-42
2. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Коваль Н.Н., Углов В.В., Черенда Н.Н. и др. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. Беларуская навука, Минск, 2013. 287 с.
3. Блейхер Г.А., Кривобоков В.П. Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 2014. 248 с.