

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С СИЛУМИНОВЫМИ СПЛАВАМИ

¹Н. В. Бибик, ¹Н. Н. Черенда, ¹В. И. Шиманский,
²А. М. Кузьмицкий, ²В. М. Асташинский

¹Белорусский государственный университет,
г. Минск, Республика Беларусь

²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

Исследованы основные физические процессы, протекающие в эвтектическом силумине при воздействии компрессионных плазменных потоков. Проведено численное моделирование процессов теплопередачи от ударно-сжатого слоя, формируемого у поверхности обрабатываемого образца плазменным потоком. Рассмотрены основные механизмы эрозии поверхности силумина под воздействием импульсов плазмы. Предложена модель гидродинамического уноса вещества с поверхностью образца, позволяющая численно оценить массу эродирующего вещества при обработке силуминовых сплавов компрессионными плазменными потоками.

Ключевые слова: силумины, компрессионные плазменные потоки, ударно-сжатый слой, эрозия, испарение, гидродинамический унос вещества

INTERACTION OF COMPRESSION PLASMA FLOWS WITH SILUMIN ALLOYS

¹N. V. Bibik, ¹N. N. Cherenda, ¹V. I. Shymanski,
²A. M. Kuzmitski, ²V. M. Astashinski

¹Belarusian State University,
Minsk, Republic of Belarus

²A. V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

The main physical processes occurring in a eutectic silumin under the impact of compression plasma flows were studied. Numerical modeling of heat transfer processes from a shock-compressed layer, formed near the surface of a treated sample by plasma flows was carried out. The main mechanisms of erosion of the silumin surface under the plasma impacts was considered. The model of hydrodynamic mass lost from the sample's surface has been proposed, that makes it possible to numerical estimate the mass of an eroding substance during plasma treatment of silumin alloys.

Keywords: silumins, compression plasma flows, shock-compressed layer, erosion, evaporation, hydrodynamic mass lost

e-mail: Bibiknv@bsu.by

ВВЕДЕНИЕ

Обработка концентрированными потоками энергии такими, как сильнооточные электронные пучки, мощные ионные пучки, лазерное и плазменное воздействие, может быть успешно применима для модификации свойств поверхностных слоев материала [1–3]. Высокая скорость ввода тепла в приповерхностный слой в режимах плавления мишени с последующей сверхбыстрой кристаллизацией приводит к диспергированию структурных составляющих обрабатываемой поверхности, формированию пересыщенных твердых растворов, аморфных и метастабильных фаз и другим структурно-фазовым превращениям, способствующих изменению тех или иных свойств материалов.

Использование компрессионных плазменных потоков (КПП), отличающихся сравнительно большой длительностью устойчивого существования разряда (~ 100 мкс), а также возможностью регулирования энергетических параметров набегающего плазменного потока, открывает значительные перспективы в области поверхностных обработок материалов. В работах [3–5] показана эффективность применения обработки КПП для улучшения прочностных и трибологических характеристик материалов.

Однако конечный результат воздействия на поверхность плазменными потоками (глубина модифицированного слоя и его структурно-фазовое состояние) является одним из наиболее сложно прогнозируемых, так как он сопровождается рядом динамических процессов, в свою очередь зависящих как от параметров набегающего потока плазмы, так и от физико-химических свойств обрабатываемого материала. Алюминиевые сплавы, и в частности силумины, являются легкоплавкими материалами, и при этом обладают относительно высокой теплопроводностью. При обработке высокоэнергетическими потоками частиц данных сплавов требуется тщательный подход в выборе режимов обработки, при которых будет обеспечено формирование глубоких модифицированных слоев, но при этом не будет достигаться температура кипения, сопровождающаяся интенсивной эрозией поверхности.

Целью данной работы являлось исследование физических процессов взаимодействия компрессионных плазменных потоков с поверхностью эвтектического силумина.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта исследования были выбраны образцы эвтектического силумина следующего состава: 12,6 Si; 0,5 Cu; 2,7 Mg; 0,3 Ni; 0,3 Fe; 0,2 Mn (ат. %). Образцы были изготовлены в виде цилиндров диаметром 15 мм и высотой 5 мм.

Силуминовые образцы обрабатывались тремя импульсами компрессионных плазменных потоков (КПП), генерируемых квазистационарным плазменным ускорителем типа магнитоплазменный компрессор компактной геометрии [3]. Предварительно откачанную вакуумную камеру заполняли азотом до давления 400 Па. Образцы силумина располагались перпендикулярно набегающему потоку плазмы. Расстояние между обрабатываемой поверхностью и срезом катода изменялась от 10 до 16 см. Спектр излучения плазмы в области поверхности образца определялся с помощью спектрометра SDH-4. Микроструктура образцов исследовалась с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss LEO1455VP. Для определения величины удаленной массы образцов после воздействия КПП осуществлялось их взвешивание на аналитических весах Radwag с точностью измерения массы $\pm 0,00005$ г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Торможение набегающего потока плазмы на поверхности обрабатываемого материала приводит к интенсивному испарению обрабатываемого материала. Под давлением набегающего потока плазмы в приповерхностной зоне обрабатываемого образца на начальном этапе обработки формируется область повышенной плотности и температуры, которую в литературе принято называть ударно-сжатым слоем (УСС). Качественный анализ спектров испускания вблизи поверхности силуминового образца (в зоне ударно-сжатого слоя) показал, что в спектре присутствуют в основном линии атомов и ионов плазмы набегающего потока, а также ионов алюминия (рис. 1). Согласно полученным данным температура вблизи поверхности обрабатываемого материала достигает 27,73 эВ. Ударно-сжатый слой существует в течение всего импульса плазмы и является экранирующим слоем между набегающим потоком плазмы и образцом, препятствуя дальнейшей интенсивной абляции поверхности.

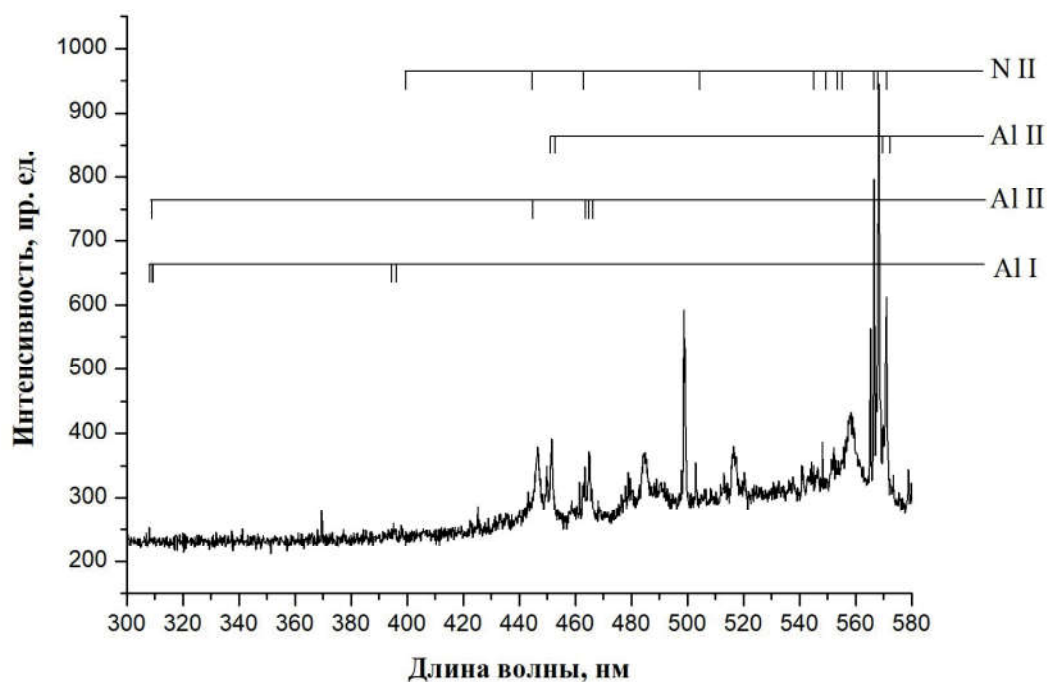


Рис. 1. Спектр излучения плазмы вблизи поверхности облучаемого образца

Посредством УСС часть кинетической энергии плазмы переходит во внутреннюю энергию образца и происходит нагрев приповерхностного слоя образца. Варьирование расстояния между срезом катода и образцом при постоянном давлении потока плазмы на мишень позволяет изменять плотность поглощённой энергии и, как результат, толщину проплавленного слоя. Путем калориметрического измерения температуры образца до и после воздействия КПП можно оценить поглощенную энергию (Q) на единицу площади:

$$Q = \frac{c \cdot m(t_2 - t_1)}{S}, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость (903,7 Дж/(кг·град) [6]); m – масса образца (1,670 г); t_1 – температура до обработки; t_2 – температура после обработки; S – площадь поверхности образца.

Полученная зависимость величины плотности энергии, поглощенной образцом, от расстояния до катода представлена на рис. 2.

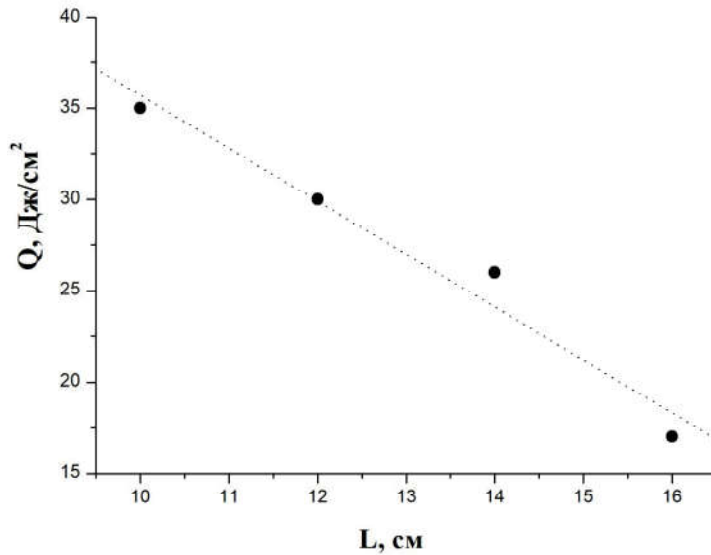


Рис. 2. Зависимость плотности поглощенной энергии от расстояния между катодом и образцом

Воздействие компрессионных плазменных потоков при данных энергетических параметрах приводит к плавлению приповерхностного слоя с последующей кристаллизацией в условиях сверхбыстрого охлаждения за счет отвода тепла в нерасплавленную часть образца. Для оценки скоростей охлаждения и толщины модифицированного можно воспользоваться классическим уравнением теплопроводности в виде [7]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где ρ – плотность силумина (2650 кг/м³ [8]) и k – теплопроводность материала (168 Вт/(м·град) [8]). 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:

$$T(x)|_{t=0} = 0. \quad (3)$$

Передача энергии от плазменного потока поверхностному слою образца происходит через ударно сжатый слой, формирующийся в приповерхностной области. 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:

$$\begin{aligned} k \frac{\partial T(x, T)}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \frac{Q}{\tau} \\ k \frac{\partial T(x, T)}{\partial x} \Big|_{x=h} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где h – толщина образца. Учет теплоты фазового перехода (плавления) в уравнении теплопроводности проводился посредством введения модифицированной функции теплоемкости:

$$c = c_0 + L \delta(T - T_m) = c_0 + \frac{L}{\Delta \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(T - T_m)^2}{2\Delta^2} \right], \quad (5)$$

где $\delta(T - T_m) - \delta$ – функция Дирака, Δ – температурный интервал переохлаждения расплава (± 4 K).

Решение уравнения (2) с начальными и граничными условиями (3)–(4) позволяет получить пространственное распределение температуры в направлении нормальному обрабатываемой поверхности (по поперечному сечению) в любой момент времени. На рис. 3 представлено пространственное распределение температуры по глубине образца в момент окончания действия импульса плазмы (т. е. через 100 мкс). Глубина расплавленного слоя, определяемая при моделировании как глубина при которой достигается температура плавления сплава, соответствует экспериментальной глубине для образцов, обработанных при небольшом значении Q , и превышает экспериментальную для образцов, обработанных при больших значениях Q в исследуемом энергетическом диапазоне (рис. 4).

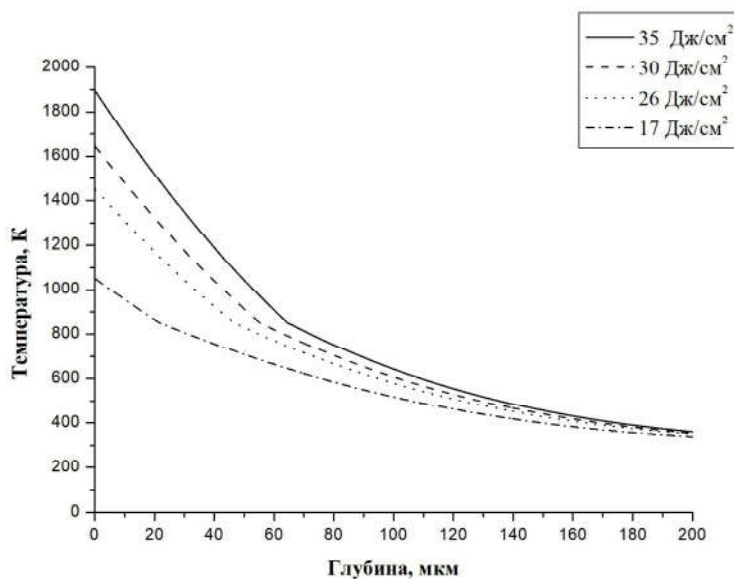


Рис. 3. Распределение температуры по глубине силумина через 100 мкс после начала действия импульса КПП при различном значении Q

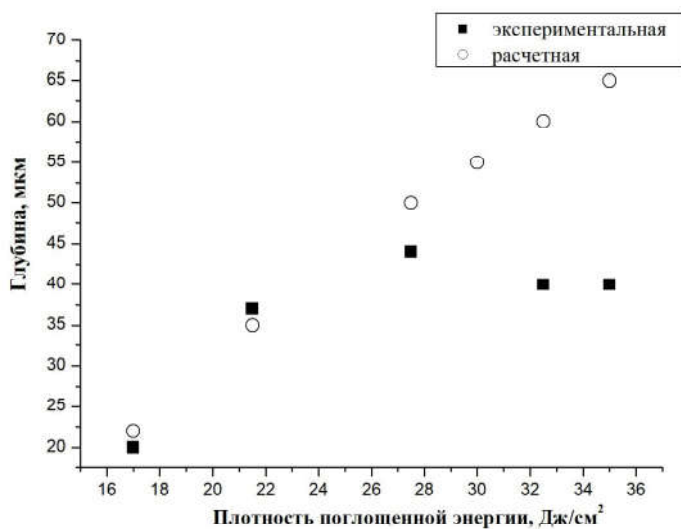


Рис. 4. Зависимость глубины проплавленного слоя от плотности поглощенной энергии

При максимальном значении $Q = 35 \text{ Дж/см}^2$ глубина составляет согласно моделированию 65 мкм, в то время как согласно данным исследований поперечного сечения с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) она составляет $\sim 40 \text{ мкм}$ (рис. 5).

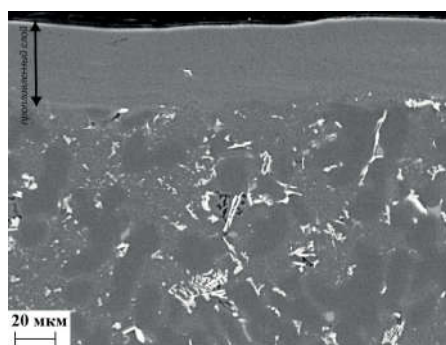


Рис. 5. Микроструктура поперечного сечения образца после воздействия КПП при $Q = 35 \text{ Дж/см}^2$

Несоответствие расчетных и экспериментальных данных обусловлен процессом тепловой эрозии, которая протекает во время обработки импульсами КПП и, как следствие, приводит к уменьшению толщины модифицированного слоя. На рис. 6 представлена экспериментальная зависимость удельной потери массы ($m_{\text{эк}}$) силуминовых образцов от плотности поглощенной энергии, полученная путем взвешивания образцов до и после воздействия импульсами КПП. Согласно полученным данным интенсивность эрозии увеличивается с увеличением плотности поглощённой энергии по экспоненциальному закону.

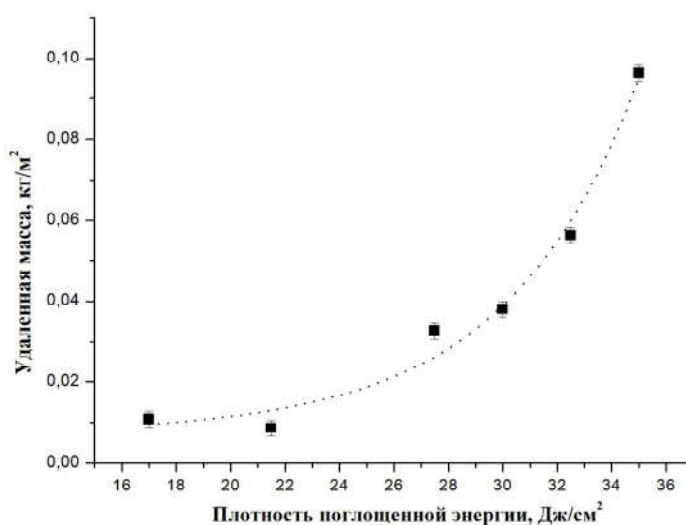


Рис. 6. Зависимость массы, удаленной за три импульса с единицы площади поверхности образцов силумина, от плотности поглощенной энергии Q

Эрозия материала при обработке импульсами плазмы обуславливается как микроскопическим уносом массы, при котором уносятся отдельные атомы и молекулы, так и макроскопическим уносом за пределы образца отдельных капель и слоев от разогретой поверхности в результате гидродинамического течения расплава [9]. Основным процессом микроскопического механизма уноса массы при плазменном воздействии, при котором не достигается температура кипения, является испарение. Скорость испарения материала, согласно [10], можно оценить по следующей формуле:

$$j = \alpha P_m(T) \sqrt{\frac{M}{2\pi kT}}, \quad (6)$$

где α – константа, которая не зависит от температуры, $P_m(T)$ – давление насыщенных паров над поверхностью при температуре T , M – масса испаряющихся атомов, k – постоянная Больцмана. Давление насыщенных паров определялось по формуле [10]:

$$\lg P_m = A - \frac{B}{T}, \quad (7)$$

где A и B – константы для данного материала. Для простоты решения рассмотрим сплав как бинарную смесь алюминия с кремнием. Для алюминия $A = 8,23$ и $B = 13300$ в диапазоне температур $887\text{--}2200$ °C [5]. Для кремния $A = 8,60$ и $B = 17900$ для диапазона температур $1223\text{--}2730$ °C [10].

Поскольку скорости испарения, зависящие от давления насыщенных паром, для кремния и алюминия различны, рассмотрим их аддитивный вклад в массу испарившегося материала. Распределение температуры по времени на поверхности, необходимое для оценки скорости испарения, бралось из решения системы уравнений (1)–(4) (рис. 7). Согласно полученным расчетам в момент окончания импульса плазмы температура на поверхности достигает максимального значения. Увеличение плотности поглощенной энергии приводит к увеличению температуры и времени существования расплава. Для образцов, обработанных, при $Q = 17$ Дж/см², время от начала плавления до начала кристаллизации составляет 75 мкс, в то время как для образцов, обработанных при 35 Дж/см², оно составляет 240 мкс.

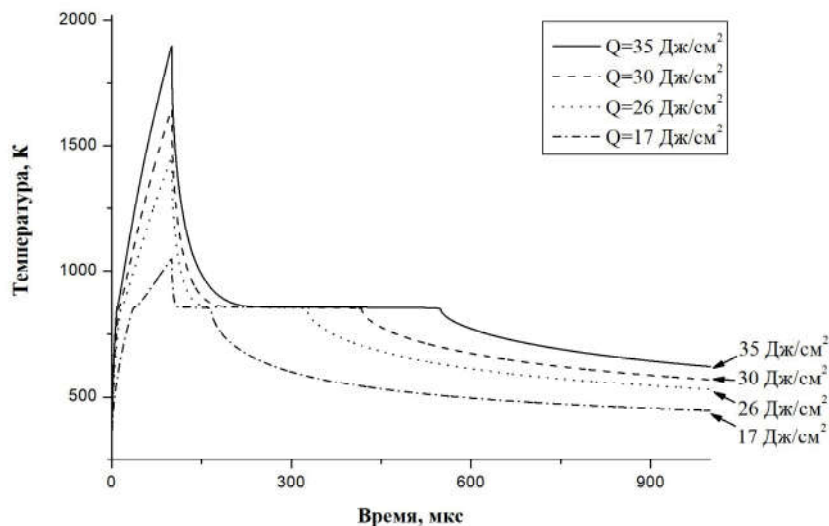


Рис. 7. Зависимость температуры поверхности образца силумина от времени при плазменной обработке с различной плотностью поглощенной энергии

Испарение атомов происходит преимущественно в тот момент времени, когда поверхностный слой находится в расплавленном (жидкостном) состоянии. Согласно расчетам, скорость испарения алюминия на два порядка выше скорости испарения кремния (рис. 8).

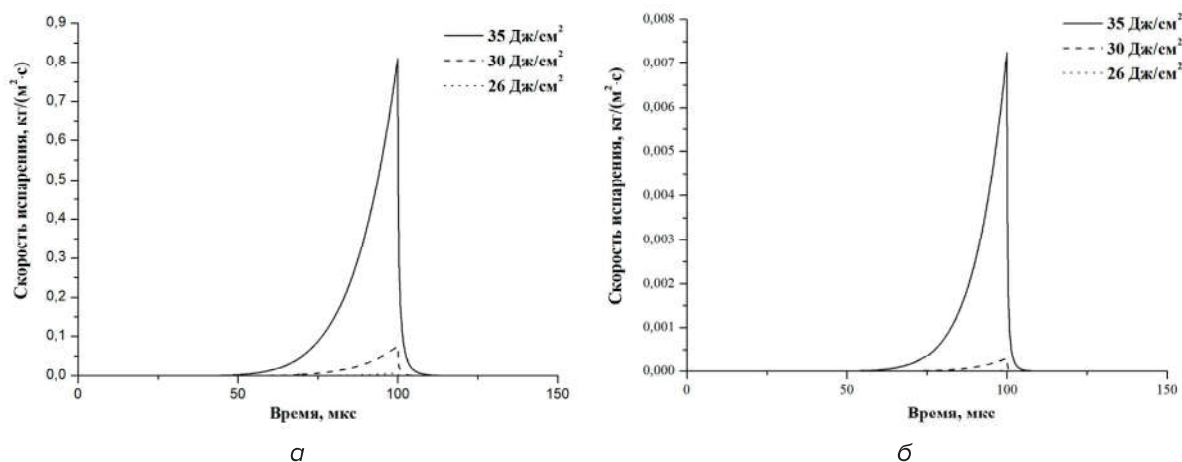


Рис. 8. Зависимость скорости испарения алюминия (а) и кремния (б) от времени

Масса испарившихся атомов $m_{исп}$ (кг/м²) на единицу площади можно представить следующим образом

$$m_{исп} = \int j dt. \quad (8)$$

Для эвтектического силумина $m_{исп} = 0,88 \cdot m_{исп}(\text{Al}) + 0,12 \cdot m_{исп}(\text{Si})$. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Табл. 1

Величина удельной массы, удаленной с поверхности, определённая экспериментально ($m_{эк}$) и при расчетах испарения ($m_{исп}$), при различных плотностях энергии

	26 Дж/см ²	30 Дж/см ²	35 Дж/см ²
$m_{эк}, \text{кг/м}^2$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$9,6 \cdot 10^{-2}$
$m_{исп}, \text{кг/м}^2$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-6}$

Проделанные расчеты позволяют сделать вывод, что микроскопический унос массы за счет испарения не является основным механизмом эрозии силуминовых сплавов под воздействием на них компрессионными плазменными потоками. Для оценки макроскопического механизма уноса массы предлагается рассмотреть модель движения расплава, обусловленную расширением ударно-сжатого слоя, давление и температура которого непрерывно растут во время импульса плазмы (рис. 9а). Скорость, с которой происходит расширение, передается непосредственно поверхностному слою расплава мишени, приводя ее в движение от центра к краям образца. В результате такого движения расплава с последующей кристаллизацией в условиях сверхбыстрого охлаждения, скорость которого, согласно расчетам, составляла порядка 10^7 К/с, формируется радиально-симметричный рельеф поверхности (рис. 9б).

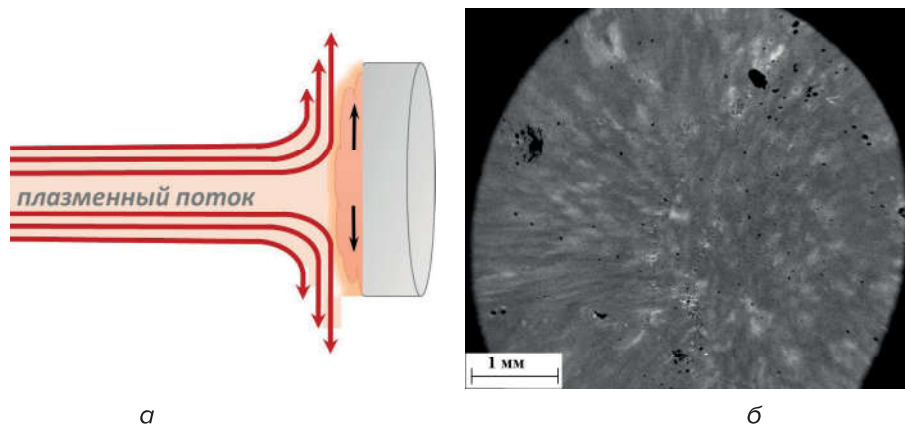


Рис. 9. Схематическое изображение расширения ударно-сжатого слоя над поверхностью расплавленного слоя (а) и морфология поверхности обработанного образца при $Q = 26 \text{ Дж/см}^2$ (б)

В течение всего времени существования плазменного потока происходит передача импульса от сформированных поверхностных волн нижележащим слоям за счет сил вязкого трения. Результатом такой передачи импульса является некоторое пространственное распределение скоростей по глубине расплавленного слоя. Можно предположить, что все слои жидкости начинают двигаться от центра образца в радиальном направлении параллельно друг другу. Пренебрегая эффектом перемешивания отдельных слоев жидкости между собой, можно определить профиль скоростей расплава по глубине (рис. 10), который подчиняется уравнению Навье – Стокса.

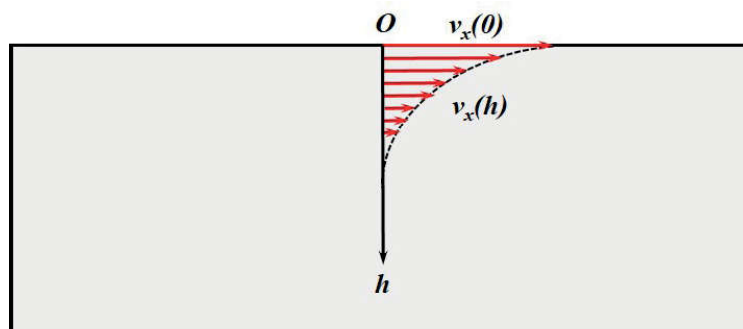


Рис. 10. Распределение скоростей расплава по глубине

Выбирая компоненты скорости вдоль плоскости и одну из них перпендикулярно, уравнение Навье – Стокса в декартовой системе координат можно записать в форме:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{v}, \quad (9)$$

где ν – кинематическая вязкость расплава.

Так как интересует только горизонтальная компонента скорости, то для соответствующей проекции записанное уравнение можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right). \quad (10)$$

Аналогично можно записать и для второй компоненты скорости v_y . Считая, что компоненты скорости v_x и v_y не зависят от горизонтальных координат x и y , а также принимая приближение несжимаемого расплава, в котором давление во всех точках одинаково, уравнение Навье – Стокса для компоненты скорости v_x можно переписать в виде:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = v \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}. \quad (11)$$

Здесь также учтено, что компонента скорости расплава v_z равна нулю, так как основным источником движения расплава является тангенциальное к его поверхности расширение ударно-сжатого слоя. В действительности, ударно-сжатый слой также будет оказывать давление на расплав, вызывая образование компоненты скорости v_z , однако, учитывая малый коэффициент сжимаемости жидкого расплава, данной компонентой скорости можно пренебречь.

Граничные условия для полученного уравнения формулируются таким образом, что на границе расплава и твердой подложки скорость расплава равна нулю, а на поверхности расплавленного слоя постоянно поддерживается постоянная скорость за счет расширения ударно-сжатого слоя. При таких условиях решение уравнения (9) может быть представлено в виде:

$$v_x(h, t) = v_{0x} \operatorname{erf} \left(1 - \frac{h}{2\sqrt{vt}} \right), \quad (12)$$

где v_{0x} – скорость расплава непосредственно на поверхности.

Полученное решение демонстрирует зависимость горизонтальной компоненты скорости расплава по глубине h и времени t . Для определения скорости расширения ударно-сжатого слоя, а также скорости течения расплава можно воспользоваться гидродинамическими законами формирования поверхностных волн [11]. Дисперсионное соотношение для поверхностных волн имеет вид:

$$\omega = \sqrt{kg + \frac{\sigma k^3}{\rho}}, \quad (13)$$

где g – ускорение свободного падения, σ – коэффициент поверхностного натяжения, ρ – плотность жидкости. Первое слагаемое в выражении (13) описывает гравитационные волны, второе слагаемое – капиллярные волны. Если толщина слоя жидкости, т. е. глубина расплавленного слоя на много превышает длину поверхностных волн, то в дисперсионном выражении можно пренебречь гравитационным слагаемым и рассматривать исключительно капиллярный эффект возникновения волн. Учитывая, что частота колебания ω связана с фазовой скоростью распространения волны v соотношением $\omega = vk$, можно получить связь между скоростью поверхностной волны и ее длиной λ :

$$v = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}}. \quad (14)$$

Именно с такой скоростью двигается слой жидкого расплава непосредственно на поверхности образца. С течением времени поверхностные волны будут затухать вследствие диссипации энергии на преодоление сил вязкого трения между слоями. Однако вследствие высокой скорости охлаждения расплава затухание волн произойти не успевают, и соответствующая форма рельефа поверхности фиксируется в твердой фазе силимина. Используя метод растровой электронной микроскопии, можно определить характерные длины поверхностных волн (рис. 11).

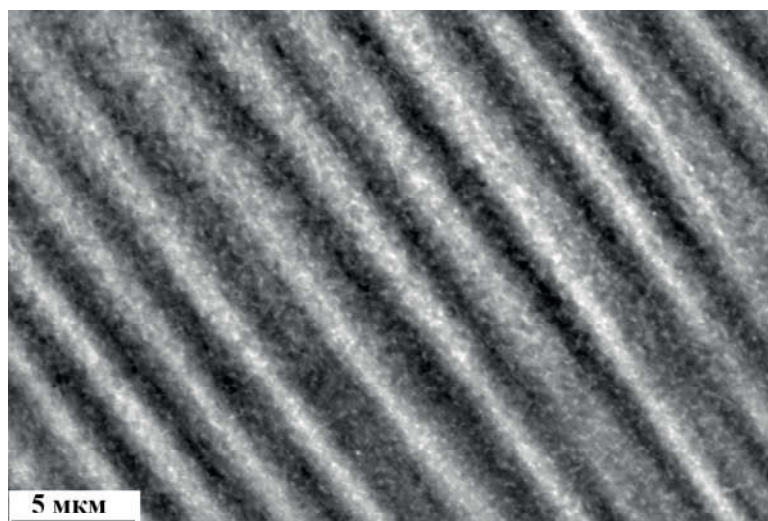


Рис. 11. РЭМ-изображения поверхности образца после воздействия КПП при $Q = 35$ Дж/см²

Зная распределение скорости расплава в радиальном направлении от центра образца, можно оценить массу (объем) расплавленного слоя, которая удаляется с образца. За бесконечно малый интервал времени dt пределы образца сможет покинуть та часть малого сектора, которая находится на расстоянии vdt от его края (рис. 12). Участки сектора, расположенные ближе к центру, успеют подойти ближе к краю образца, однако не смогут покинуть его пределы.

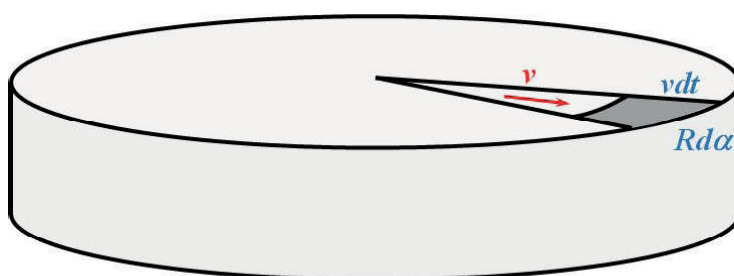


Рис. 12. Изображение участка поверхности, уносимого за счет растекания

Элементарная масса dm , удаляемая за единицу времени dt за пределы образца, связана с плотностью расплава ρ и элементарным объемом dV следующим образом:

$$dm = \rho dV. \quad (15)$$

Под элементарным объемом dV здесь понимается тонкий слой толщиной dh , в пределах которого скорость растекания расплава может считаться постоянной.

Так как скорость расплава уменьшается с глубиной, то и длина удаляемого сектора также будет уменьшаться с глубиной расплава. Тогда вся масса, удаленная с приповерхностного слоя образца, может быть посчитана путем интегрирования:

$$m = \int dm = 2\pi\rho R \int \int v(h,t) dh dt, \quad (16)$$

где R – радиус образца.

После подстановки полученного значения скорости можно получить:

$$m = 2\pi\rho R v \int_0^H \int_{T_1}^{T_2} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{h}{2\sqrt{vt}} \right) dt dh. \quad (17)$$

Здесь интегрирование проводится по двум независимым переменным: времени и глубине расплава. Пределы интегрирования по глубине расплава определяются глубиной расплавленного слоя H . Интервал интегрирования по времени определяется временем начала T_1 и окончания T_2 существования расплава, которые могут быть определены из решения уравнения теплопроводности (рисунок с результатами по времени) для различных значений плотности поглощенной энергии. Учитывая начальную скорость на поверхности расплава, окончательно имеем:

$$m = 2\pi\rho R \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}} \int_0^H \int_{T_1}^{T_2} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{h}{2\sqrt{\nu t}}\right) dt dh. \quad (18)$$

Полученное выражение позволяет оценить изменение массы образца за один импульс воздействия потока плазмы за счет гидродинамического уноса массы. Используя параметры жидкого расплава силумина эвтектического состава [8, 10]: коэффициент поверхностного натяжения 0,908 Н/м и кинематическая вязкость $5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, а также учитывая различные значения времени существования расплава и глубину расплавленного слоя, представленные на рис. 3 и 7, соответственно, была вычислена удаленная масса как результат моделирования гидродинамического уноса массы (m_m) при различных величинах плотности поглощенной энергии. Результаты приведены в табл. 2.

Табл. 2

Величина удельной массы, удаленной с поверхности, определённая экспериментально ($m_{эк}$) и при расчетах гидродинамического уноса вещества (m_m), при различных значениях плотности поглощенной энергии

	26 Дж/см ²	30 Дж/см ²	35 Дж/см ²
$m_{эк}$, кг/м ²	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$	$9,6 \cdot 10^{-2}$
m_m , кг/м ²	$7,1 \cdot 10^{-2}$	$11,6 \cdot 10^{-2}$	$17,2 \cdot 10^{-2}$

Модель гидродинамического уноса массы не учитывает обтекание расплава края образца, отражающееся в несколько завышенных значениях расчетных данных по сравнению с экспериментальными, что будет предусмотрено в дальнейших исследованиях. Однако соответствие порядка экспериментальных и расчетных величин удаленной массы говорит о адекватности предложенной модели.

ВЫВОДЫ

Численно и экспериментально показано, что обработка компрессионными плазменными потоками с плотностью поглощенной энергии 17–35 Дж/см² эвтектического силумина приводит к плавлению приповерхностного слоя и формированию модифицированного слоя толщиной до 40 мкм. Воздействие импульсов плазмы сопровождается тепловой эрозией материала. Установлено, что основным механизмом эрозии силумина при плазменной обработке является гидродинамический унос материала. Предложена модель численной оценки массы унесённого материала при макроскопическом механизме тепловой эрозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Паркин, А. А. Физические основы обработки материалов концентрированными потоками энергии : учеб. пособ. / А. А. Паркин. Самара : СамГТУ, 2007 – 208 с.
2. Effect of electron beam energy densities on the surface morphology and tensile property of additively manufactured Al-Mg alloy / Y. Geng [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2021. – Рр. 15–22.
3. Модификация материалов компрессионными плазменными потоками / В. В. Углов [и др.]. Минск : БГУ, 2013. – 248 с.

4. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А. П. Ласковнев [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2013. 287 с.
5. Modification of hypereutectic Al–Si alloy surface layer structure by Nb alloying under high temperature plasma impact / N. Cherenda [et al.] // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2022. – Vol. 26(2). – Pp. 91–100.
6. Физические величины : справочник / А. П. Баби́чев [и др.] ; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
7. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : МГУ имени М. В. Ломоносова, 1999. – 798 с.
8. Сплавы алюминиевые литейные технические условия : ГОСТ 1583-93. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003.
9. Блейхер, Г. А. Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц / Г. А. Блейхер, В. П. Кривобоков. – Новосибирск : Наука, 2014. 248 с.
10. Новый справочник химика и технолога. Общие сведения. Строение вещества. Физические свойства важнейших веществ. Ароматические соединения. Химия фотографических процессов. Номенклатура органических соединений. Техника лабораторных работ. Основы технологии. Интеллектуальная собственность / Е. Е. Бибик [и др.]. – СПб. : Проффессионал, 2006. 1464 с.
11. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособ. : для вузов. В 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 5-е изд., стереот. – М. : Физматлит, 2001. – Т. VI. Гидродинамика. – 736 с.

REFERENCES

1. Parkin A. A. *Fizicheskie osnovy obrabotki materialov kontsentrirrovannymi potokami energii* [Physical bases of materials processing by concentrated energy flows]. Samara, Samara State Technical University Publ., 2007, 208 p. (in Russian).
2. Geng Y. Effect of electron beam energy densities on the surface morphology and tensile property of additively manufactured Al–Mg alloy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2021, pp. 15–22.
3. Uglov V. V. *Modifikatsiya materialov kompressionnymi plazmennymi potokami* [Modification of materials by compression plasma flows]. Minsk, Belarusian State University Publ., 2013, 248 p. (in Russian).
4. Laskovnev A. P. *Modifikatsiya struktury i svoystv evtekticheskogo silumina elektronno-ionno-plazmennoj obrabotkoj* [Modification of structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma treatment]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013, 287 p. (in Russian).
5. Cherenda N. Modification of hypereutectic Al–Si alloy surface layer structure by Nb alloying under high temperature plasma impact. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2022, vol. 26 (2), pp. 91–100.
6. Babichev A. P., Grigor'e-va I. S., Meilikhova E. Z. *Fizicheskie velichiny* [Physical quantities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991, 1232 p. (in Russian).
7. Tikhonov A. N., Samarskij A. A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Lomonosov Moscow State University Publ., 1999, 798 p. (in Russian).
8. GOST 1583-93. *Splavy alyuminievye litejnye tekhnicheskie usloviya* [State Standart 1583-93. Aluminum casting alloys technical specifications]. Minsk, Mezghosudarstvennyj sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii izdanie Publ., 2003. (in Russian).
9. Blejkher G. A., Krivobokov V. P. *Eroziya poverkhnosti tverdogo tela pod dejstviem moshchnykh puchkov za-ryazhennykh chastits* [Erosion of solid surface under the action of powerful beams of charged particles]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2014, 248 p. (in Russian).
10. Bibik E. E. *Novyj spravochnik khimika i tekhnologa. Obshchie svedeniya. Stroenie veshchestva. Fizicheskie svoystva vazhnejshikh veshchestv. Aromaticheskie soedineniya. Khimiya foto-graficheskikh protsessov. Nomenklatura organicheskikh soedinenij. Tekhnika laboratornykh rabot. Osnovy tekhnologii. Intellektual'naya sobstvennost'* [New Handbook of Chemist and Technologist. General Information. Structure of substances. Physical properties of the most important substances. Aromatic compounds. Chemistry of photographic processes. Nomenclature of organic compounds. Technique of laboratory works. Fundamentals of technology. Intellectual property]. St. Petersburg, Professional Publ., 2006, 1464 p. (in Russian).
11. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika. Gidrodinamika* [Theoretical physics. Hydrodynamics]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 736 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 13.06.2024 г.