

## Эрозия Al-Si эвтектического сплава под воздействием компрессионных плазменных потоков

*Н.В. Бибик<sup>1</sup>, В.И. Шиманский<sup>1</sup>, Н.Н. Черенда<sup>1,\*</sup>, В.М. Асташинский<sup>2</sup>, А.М. Кузьмицкий<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*  
*\*cherenda@bsu.by*

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования эрозии поверхности образцов эвтектического силумина при воздействии компрессионных плазменных потоков. Обсуждаются основные механизмы эрозии. Установлено, что при плазменном воздействии основным механизмом эрозии поверхности является гидродинамический унос вещества. Предложена модель оценки уноса массы при гидродинамическом течении расплава.

**Ключевые слова:** силумин, компрессионные плазменные потоки, эрозия, гидродинамическое течение вещества, испарение.

### 1. Введение

Силумины (сплавы Al-Si) – одни из наиболее распространённых литейных алюминиевых сплавов, что обусловлено рядом их свойств, в частности низким коэффициентом термического расширения, малым удельным весом, хорошей коррозионной стойкостью. Одним из путей улучшения механических свойств данных сплавов является увеличение дисперсности основных структурных составляющих сплава: эвтектики,  $\alpha$ -Al и кристаллов кремния. Ранее в работах [1, 2] было показано эффективность использования для достижения данных целей компрессионных плазменных потоков (КПП), воздействие которыми приводит к плавлению приповерхностного слоя, конвективному перемешиванию структурных составляющих и дальнейшей кристаллизации в условиях сверхбыстрого охлаждения. Сформированный таким образом приповерхностный слой характеризуется гомогенной дисперсной структурой и улучшенными прочностными характеристиками.

Структурно-фазовое состояние, а также толщина модифицированного слоя определяется энергетическими параметрами набегающего плазменного потока и может быть предварительно оценена из решения уравнения теплопроводности. В ряде работ показано [1–3], что глубина модифицированного слоя увеличивается с увеличением плотности поглощенной энергии, что связано с ростом максимальной температуры, достигаемой во время обработки. Однако стоит отметить, что воздействие компрессионными плазменными потоками сопровождается процессом эрозии, которая не учитывается при решении классического уравнения теплопроводности и в результате которой часть обрабатываемого материала уносится за пределы образца, что влияет на конечную толщину модифицированного слоя.

В настоящей работе обсуждаются основные механизмы эрозии поверхности силуминового сплава эвтектического состава, подвергнутого воздействию компрессионными плазменными потоками. Впервые предложена модель оценки массы эродирующего вещества под воздействием импульсов плазмы, учитывающая гидродинамическое течение расплава.

### 2. Методика эксперимента

Объектом исследования являлись образцы эвтектического силумина следующего состава: 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 изготавливались в форме цилиндров высотой 5 мм и диаметром 15 мм. Исследуемые образцы обрабатывались компрессионными плазменными потоками, генерируемыми газоразрядным магнитоплазменным компрессором компактной геометрии [2]. Напряжение

на накопительной батарее конденсаторов во время обработки составляло 4 кВ. Обработка осуществлялась в режиме остаточного газа, при котором предварительно откачанную вакуумную камеру заполняли азотом до давления 400 Па. Расстояние между катодом и образцом варьировалась от 16 см до 10 см с шагом 1 см, что соответствовало согласно калориметрическим измерениям изменению плотности поглощенной энергии в диапазоне 17–35 Дж/см<sup>2</sup>. Образцы обрабатывались тремя последовательными импульсами плазмы.

Для определения величины удаленной массы образцов после воздействия КПП осуществлялось их взвешивание на аналитических весах Radwag, точность измерения массы в которых составляла ±0.05 мг. Анализ морфологии поверхности обработанных образцов проводился с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе LEO1455 VP при ускоряющем напряжении 20 кВ и оптической микроскопии (ОМ) на микроскопе МИ-1.

### 3. Результаты и обсуждение

Известно, что основными механизмами эрозии при воздействии высокоэнергетических потоков энергии являются поверхностное испарение и гидродинамический унос вещества [4, 5]. Скорость испарения  $j$  (кг/(м<sup>2</sup>·с)) можно оценить по следующей формуле:

$$j = \alpha P_m(T) \sqrt{\frac{M}{2\pi kT}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – константа,  $P_m(T)$  – давление насыщенных паров над поверхностью, зависящее от температуры  $T$ ,  $M$  – масса испаряющихся атомов,  $k$  – постоянная Больцмана. Давление насыщенных паров может быть рассчитано по формуле:

$$\lg p_m = A - \frac{B}{T}, \quad (2)$$

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 887–2200 °С [5]. Для кремния  $A = 8.60$  и  $B = 17900$  для диапазона температур 1223–2730 °С [6]. Согласно проведенным расчетам испарение атомов происходит преимущественно в тот момент времени, когда поверхностный слой находится в расплавленном (жидкостном) состоянии. Масса испарившихся атомов  $m_{ucn}$  (кг/м<sup>2</sup>) на единицу площади можно представить следующим образом:

$$m_{ucn} = \int j dt. \quad (3)$$

Для эвтектического силумина  $m_{ucn} = 0.88 \cdot m_{ucn}(Al) + 0.12 \cdot m_{ucn}(Si)$ . Согласно полученным результатам масса испарившегося материала с единицы площади при воздействии КПП с плотностью поглощенной энергии 35 Дж/см<sup>2</sup> составляет  $8.7 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>2</sup>, что на четыре порядка меньше удаленной массы, полученной экспериментально и составляющей  $9.6 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>2</sup>.

Для анализа второго механизма эрозии (гидродинамического уноса вещества) необходимо рассмотреть процесс взаимодействия плазменного потока с поверхностью мишени. В приповерхностном слое образца в первые десятки микросекунд взаимодействия плазмы с облучаемым материалом образуется область повышенной плотности и давления, так называемый ударно-сжатый слой (УСС), состоящий из продуктов абляции и испарения образца [6]. Данный УСС удерживается у поверхности образца набегающим потоком плазмы и служит барьерным слоем, через который осуществляется передача тепловой энергии от потока плазмы материалу за счет теплопроводности. С увеличением температуры ударно-

сжатого слоя и его внутреннего давления из-за повышения плотности испарившихся атомов происходит его расширение. Скорость, с которой происходит расширение, передается непосредственно поверхностному слою расплава мишени, приводя ее в движение в радиальном направлении. За счет сил внутреннего трения (вязкости) происходит передача импульса от поверхности образца к нижележащим слоям. Результатом такой передачи импульса является некоторое пространственное распределение скоростей по глубине расплавленного слоя. Можно предположить, что все слои жидкости начинают двигаться от центра образца (для случая центрального падения плазменного потока на поверхность образца) в радиальном направлении параллельно друг другу. Пренебрегая эффектом перемешивания отдельных слоев жидкости между собой, можно определить профиль скоростей расплава по глубине (рис. 1), который подчиняется уравнению Навье-Стокса.

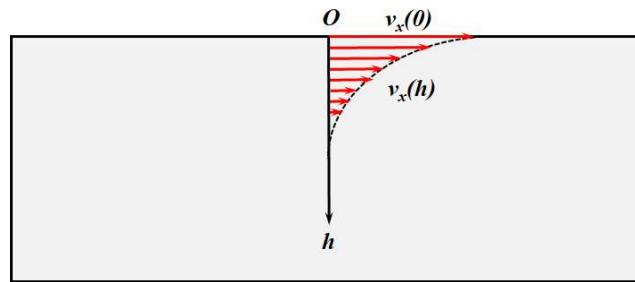


Рис. 1. Распределение скоростей расплава по глубине.

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

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{v}, \quad (4)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость расплава.

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 (4) может быть представлено в виде:

$$v_x(h, t) = v_{0x} \operatorname{erf} \left( 1 - \frac{h}{2\sqrt{\nu t}} \right), \quad (5)$$

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 поверхности воспользуемся гидродинамическими законами формирования поверхностных волн. Дисперсионное соотношение для поверхностных волн имеет вид:

$$\omega = \sqrt{kg + \frac{\sigma k^3}{\rho}}, \quad (6)$$

где  $\omega$  – частота колебания поверхностных волн,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $\rho$  – плотность жидкости. Первое слагаемое в выражении (6) описывает гравитационные волны, второе слагаемое – капиллярные волны. Если толщина слоя жидкости, то есть глубина расплавленного слоя намного превышает

длину поверхностных волн, то в дисперсионном выражении можно пренебречь гравитационным слагаемым и рассматривать исключительно капиллярный эффект возникновения волн. Учитывая, что частота колебания  $\omega$  связана с фазовой скоростью распространения волны  $v$  соотношением  $\omega = vk$ , можно получить связь между скоростью поверхностной волны и ее длиной  $\lambda$ :

$$v = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}}, \quad (7)$$

Именно с такой скоростью движется 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 силумина. Используя метод оптической и растровой электронной микроскопий, можно определить характерные длины поверхностных волн (рис. 2).

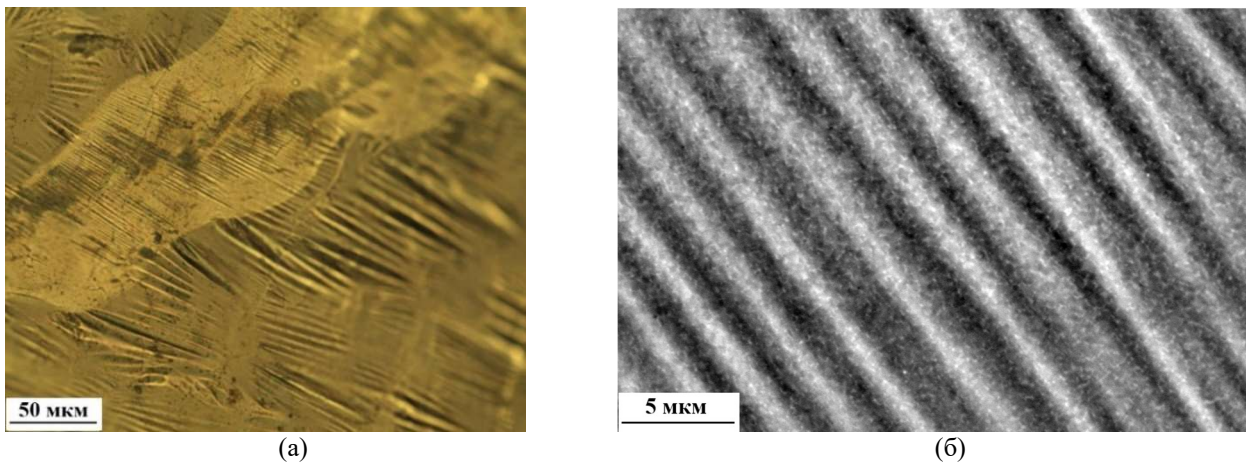


Рис. 2. Изображения поверхности образца, обработанного тремя импульсами плазмы при  $Q = 35 \text{ Дж/см}^2$ , полученные с помощью ОМ (а) и РЭМ(б).

Зная распределение скорости расплава в радиальном направлении от центра образца, можно оценить массу (объем) расплавленного слоя, которая удаляется с образца (рис. 3).



Рис. 3. Изображение участка поверхности, уносимого за счет растекания

За бесконечно малый интервал времени  $dt$  пределы образца сможет покинуть та часть малого сектора, которая находится на расстоянии  $vdt$  от его края. Участки сектора, расположенные ближе к центру, успеют подойти ближе к краю образца, однако не смогут покинуть его пределы. Элементарная масса  $dm$ , удаляемая за единицу времени  $dt$  за пределы образца, связана с плотностью расплава  $\rho$  и элементарным объемом  $dV$  следующим образом:

$$dm = \rho dV, \quad (8)$$

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:

$$m = \int dm = 2\pi\rho R \iint v(h,t) dh dt, \quad (9)$$

где  $R$  – радиус образца.

После подстановки полученного значения скорости можно получить:

$$m = 2\pi\rho R v' \int_0^H \int_{T_1}^{T_2} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{h}{2\sqrt{vt}}\right) dt dh, \quad (10)$$

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 [3] для различных значений плотности поглощенной энергии. Учитывая начальную скорость на поверхности расплава, окончательно имеем:

$$m = 2\pi\rho R \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\rho\lambda}} \int_0^H \int_{T_1}^{T_2} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{h}{2\sqrt{vt}}\right) dt dh, \quad (11)$$

Полученное выражение позволяет оценить изменение массы образца за один импульс воздействия потока плазмы за счет гидродинамического разлета. Используя параметры жидкого расплава силумина эвтектического состава [7]: плотность  $2400 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент поверхностного натяжения  $0.908 \text{ Н/м}$  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, полученные из решения классического уравнения теплопроводности в работе [3], была получена зависимость величин удаленной массы от величины плотности поглощенной энергии для образца цилиндрического образца радиусом  $0.75 \text{ см}$ . Результаты приведены на рис. 4.

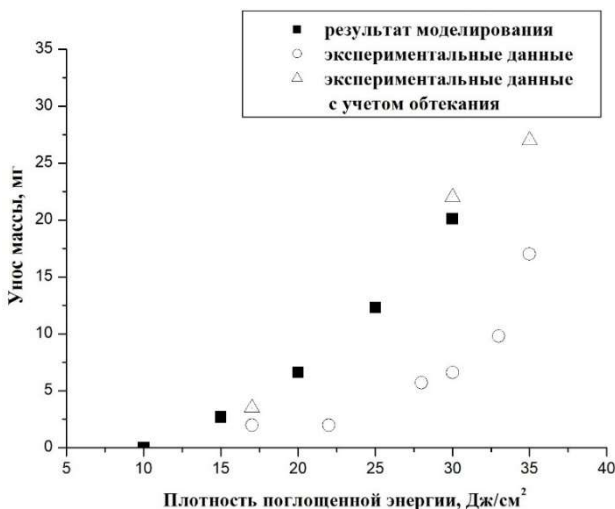


Рис. 4. Зависимость уноса массы от плотности поглощенной энергии.



Рис. 5. Изображение образца после воздействия КПП при  $30 \text{ Дж/см}^2$ .

Значения уноса массы, полученные экспериментально и при моделировании, имеют один и тот же порядок, однако имеющееся расхождение в значениях больше погрешности измерения и связано с тем, что в модели не учитывается обтекание расплавом края образца. Часть расплава достигая края образца не покидает его пределы, а остается на образце (обтекает его), увеличивая радиус в верхней его части (рис. 5). По увеличению радиуса образца можно оценить массу расплава, которая достигла края образца, но осталась на нем. Учет данной массы дает хорошую сходимости между экспериментальными и расчетными данными.

#### 4. Выводы

Воздействие компрессионных плазменных потоков на образцы эвтектического силумина приводят к уносу массы вещества с поверхности силумина, увеличивающемуся с ростом плотности поглощенной энергии. Показано, что основным механизмом уноса массы является гидродинамическое течение расплава, обусловленное расширением ударно-сжатого слоя у поверхности образца во время обработки. В результате такого движения часть расплава, достигая край образца, покидает его пределы. Предложена модель оценки уноса массы при гидродинамическом течении вещества, основанная на определении скорости движения расплава, его максимальной температуры и времени существования.

#### 5. Литература

- [1] Н.Н. Черенда, Н.В. Бибик, В.В. Углов, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий, Модифицирование поверхностного слоя эвтектического силумина компрессионными плазменными потоками, *Физика и химия обработки материалов*, **3**, 37–42, 2012.
- [2] А.П. Ласковнев, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова, Н.Н. Коваль, В.В. Углов, Н.Н. Черенда и др., *Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-плазменной обработкой*. Минск: Беларуская навука, 2013.
- [3] Н.Н. Черенда, Н.В. Бибик, В.М. Асташинский, А.М. Кузьмицкий, Теплоперенос в эвтектическом силумине, подвергнутом воздействию компрессионными плазменными потоками, *15-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом»*, 26–29 сентября 2023 г., Минск, Беларусь, 320–321, 2023.
- [4] Г.А. Блейхер, В.П. Кривобоков, *Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц*. Новосибирск: Наука, 2014.
- [5] Е.Е. Бибик и др., *Новый справочник химика и технолога*. (ред. А.В. Москвин). СПб.: НПО «Профессионал», 2006.
- [6] В.В. Углов, Н.Н. Черенда, В.М. Анищик и др., *Модификация материалов компрессионными плазменными потоками*. Минск: БГУ, 2013.
- [7] А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др., *Физические величины: Справочник* (Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова). М.: Энергоатомиздат, 1991.