

## ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КРЕМНИЯ НА ЭРОЗИЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНОВОГО СПЛАВА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПЛАЗМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Е.А. Крутилина<sup>1)</sup>, Н.Н. Черенда<sup>1)</sup>, Н.Н. Руденик<sup>1)</sup>, А.М. Кузьмицкий<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, soldatenko@tut.by

<sup>2)</sup>Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,  
ул. П. Бровки 15, 220072 Минск, Беларусь

Изучен процесс эрозии поверхностных слоев заэвтектических силуминовых сплавов с содержанием кремния 20 и 44 ат.% под воздействием разного количества импульсов КПП. Установлено, что эрозия протекает в жидкофазном состоянии. Ее основными механизмами являются гидродинамическое течение расплава с его вытеснением за края образца давлением КПП и испарение элементов с расплавленной поверхности. Количество массы, удаленной с поверхности образца силуминового сплава с 20 ат.% кремния, больше такового при содержании кремния 44 ат.%.

**Ключевые слова:** заэвтектический силуминовый сплав; компрессионные плазменные потоки; эрозия.

## INFLUENCE OF SILICON CONTENT ON SURFACE LAYERS EROSION OF HYPREUTECTIC SILUMINE ALLOY AT PULSED PLASMA TREATMENT

E.A. Krutuilina<sup>1)</sup>, N.N. Cherenda<sup>1)</sup>, N.N. Rudenik<sup>1)</sup>, A.M. Kuzmitsky<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, soldatenko@tut.by

<sup>2)</sup>Institute of Heat and Mass Transfer. A.V. Luikov National Academy of Sciences of Belarus,  
15 P. Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus

The process of erosion of surface layers of hypereutectic silumin alloys with a silicon content of 20 and 44 at.% under the influence of a different number of CPF pulses has been studied. It was found that erosion proceeds in a liquid phase state. Its main mechanisms are the hydrodynamic flow of the melt with its displacement beyond the edges of the sample by the CPF pressure and the evaporation of elements from the molten surface. The amount of mass removed from the surface of a sample of a silumin alloy with 20 at.% silicon is greater than that with a silicon content of 44 at.%.

**Keywords:** hypereutectic silumin alloy; compression plasma flows; erosion.

### Введение

В контексте современного развития науки и техники все более востребованными становятся материалы, обладающие комплексом высоких эксплуатационных характеристик и высокой технологичностью в процессе производства. Здесь особое место занимают заэвтектические сплавы системы Al-Si. Такой состав обеспечивает повышенную твердость сплава, низкий линейный коэффициент температурного расширения и, как следствие, особую перспективность для использования в машиностроении и приборострое-

нии.

В последнее время активно ведется поиск метода диспергирования структуры заэвтектических силуминовых сплавов, т. к. крупные включения кремния обуславливают высокие внутренние напряжения в структуре, приводящие к снижению эксплуатационных характеристик изделий. Обработка силуминовых сплавов высокоэнергетическими потоками плазмы и заряженных частиц, как показали предварительно выполненные исследования [1, 2], позволяет путем многократного плавления сформировать поверхностный слой,

имеющий субмикро- или наноразмерную структуру, а также при необходимости равномерно легировать модифицированный слой различного рода элементами.

Однако взаимодействие импульсных потоков энергии с материалом сопровождается эрозией их поверхностных слоев [3].

Цель данной работы состоит в изучении зависимости процесса эрозии поверхностного слоя заэвтектических силуминовых сплавов от содержания кремния (20 и 44 ат.%) под действием компрессионных плазменных потоков, а также в определении основных механизмов эрозии.

### Объект и методика эксперимента

В качестве объекта исследования использовались образцы заэвтектического силуминового сплава с содержанием кремния 44 ат.% (Al-44 Si) и 20 ат.% (Al – 20 Si). Все образцы подвергались воздействию компрессионных плазменных потоков (КПП), генерируемых в магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии. Плазменный поток формировался в остаточной атмосфере азота (при давлении 400 Па). Напряжение на накопительной системе конденсаторов составляло 4,0 кВ, расстояние между поверхностью образца и электродами в компрессоре – 8 см. Обработка проводилась 1, 3, 5 и 7 последовательными импульсами с интервалом 10 с, длительность каждого из которых составляла 100 мкс. В работе исследовалось влияние количества импульсов на процессы эрозии поверхности.

Исследуемые образцы заэвтектического силуминового сплава до и после обработки компрессионными плазменными потоками взвешивались на аналитических весах Radwag с точностью измерения массы  $\pm 0.05$  мг.

Особенности морфологии поверхности образцов после плазменного воздействия анализировались с использованием оптического микроскопа МИ-1.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена зависимость массы, удаленной с единицы площади поверхности образцов заэвтектического силуминового сплава, от количества импульсов воздействия. В обоих случаях количество массы, удаленной с единицы площади поверхности, увеличивается с ростом числа импульсов. Однако можно заметить, что для силуминового сплава с содержанием кремния 20 ат.% унос массы больше по сравнению с таковым для силуминового сплава с содержанием кремния 44 ат.%.

Согласно результатам исследования методом оптической микроскопии, морфология поверхности после воздействия КПП существенно изменяется (рис. 2). Она становится более однородной, наблюдается формирование волнообразного рельефа (рис. 2в, г), что свидетельствует о полном плавлении поверхностного слоя образцов и связано с действием сил поверхностного натяжения в расплаве. Таким образом, можно заключить, что в процессе плазменного воздействия реализуются механизмы эрозии поверхности, связанные с жидкофазными процессами, к числу которых относится гидродинамическое течение расплава и его последующее вытеснение за края образца давлением КПП. Подобные механизмы были отмечены авторами [4].

Как отмечалось ранее, для силумина с концентрацией кремния 20 ат.% разность начальной и конечной массы будет возрастать с увеличением количества импульсов намного быстрее и заметнее, чем для Al-44Si.

Можно предположить, причина этого заключается в следующем. Так как температура плавления алюминия ниже таковой кремния ( $T_{пл}(Al)=660$  °C,  $T_{пл}(Si)=1415$  °C [5]), а плавление эвтектики Al-Si происходит при еще более низкой температуре (577 °C), больший унос массы обусловлен меньшим содержанием кремния (20 ат.%) и, как следствие, формированием более однородного расплава алюминия большего объема.

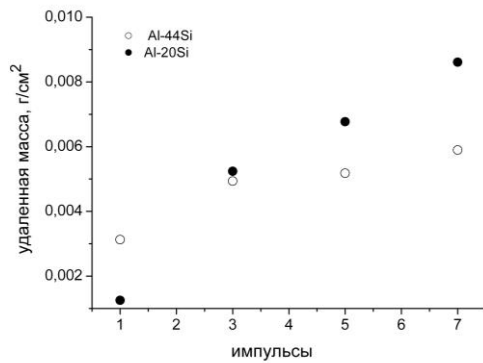


Рис. 1. Зависимость массы, удаленной с единицы площади поверхности силуминового сплава в результате его облучения разным количеством импульсов КПП

Fig.1. Dependence of the mass removed from a surface unit of a silumin alloy as a result of its irradiation with a different number of CPF pulses

Можно предположить, что в таком случае будет интенсивнее протекать процесс испарения с поверхности расплава. Так, с учетом формулы для скорости испарения материала в вакууме в зависимости от давления насыщенных паров материала при данной температуре [4] и того, что давление насыщенных паров алюминия выше такового для кремния при приблизительно одинаковой температуре расплава (при температуре 1440°C давление насыщенных паров алюминия составляет  $10^2$  Па, для кремния давление насыщенных паров составляет 10 Па при температуре 1454°C [5]). Таким образом, для кремния точка насыщения, т.е. соответствие внешнего давления давлению насыщенных паров наступает раньше (по времени) по сравнению с алюминием. В этом случае процесс испарения кремния характеризуется динамическим равновесием с процессом конденсации.

В то же время точка насыщения для алюминия достигается позже и процесс его испарения идет более интенсивно. Этим и объясняется более интенсивный унос вещества, вследствие испарения, в образцах заэвтектических силуминов с большим содержанием кремния.

Помимо механизма испарения, связанного с непосредственным атомарным испарением, необходимо учитывать механизм удаления массы за счет гидродина-

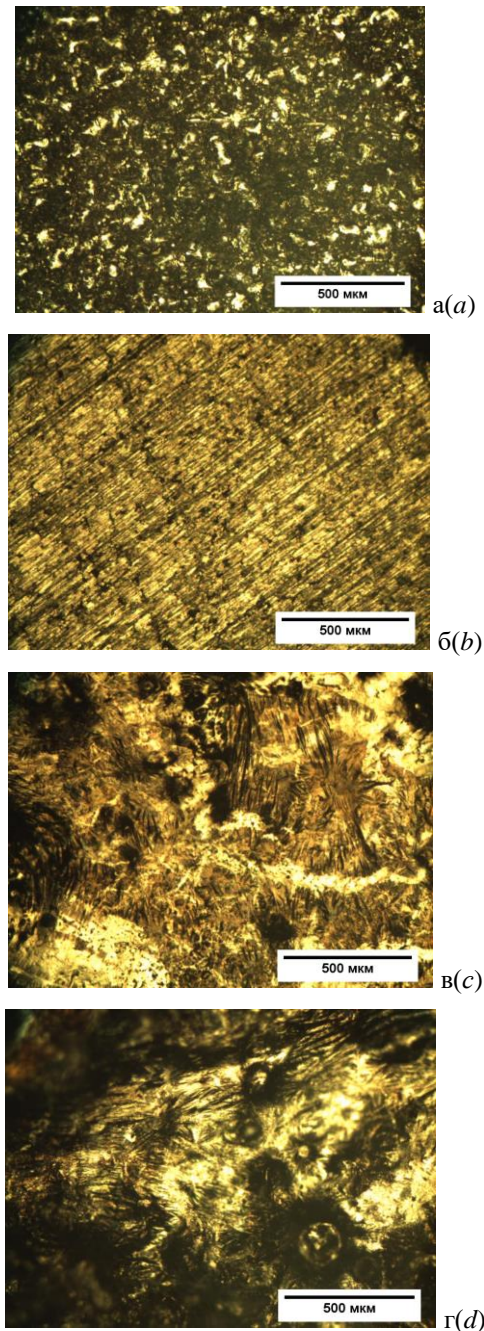


Рис. 2. Поверхность заэвтектических силуминовых сплавов Al-20Si (а, в) и Al-44Si (б, г) в исходном состоянии (а, б) и после воздействия 5 импульсами КПП (в, г), x100

Fig. 2. The surface of the hypereutectic silumin alloys Al-20Si (a, c) and Al-44Si (b, d) in the initial state (a, b) and after influence of 5 pulses of CPF (c, d), x100

мического разлета поверхностного слоя, находящегося в жидкой фазе. Формируемый в результате воздействия КПП расплавленный слой Al-20Si, по-видимому, характеризуется меньшей вязкостью ввиду более однородного переплавления по-

верхностного слоя заэвтектического силуминового сплава вследствие меньшего содержания кремния, что должно способствовать более легкому гидродинамическому движению расплава. Помимо этого, на движение расплава силуминового сплава будет оказывать влияние присутствие нерасплавленных включений первичного кремния, которые в сплаве Al-44Si имеют более крупный размер. Следовательно, гидродинамическое течение такого расплава будет затруднено по сравнению с расплавом состава Al-20Si. Также следует подчеркнуть, что поверхностное натяжение жидкого алюминия будет иметь меньшее значение, чем для жидкого кремния при одной и той же температуре ( $\sigma(\text{Al})=725$  мН/м при  $1600^\circ\text{C}$ ,  $\sigma(\text{Si})=750$  мН/м при  $1550^\circ\text{C}$  [5]), поэтому, расплав алюминия легче будет вытесняться за края образца.

### Заключение

Таким образом, было установлено, что воздействие компрессионных плазменных потоков (КПП) приводит к эрозии поверхностных слоев Al-20Si и Al-44Si, которая протекает преимущественно в жидкофазном состоянии. Возможными механизмами эрозии являются гидродинамическое течение расплава с последующим его вытеснением за края образцов давлением КПП, а также поверхностное испарение элементов сплава. Большое количество удаленной массы в случае воздействия КПП на Al-20Si обусловлено большим содержанием в сплаве алюминия, который является более легкоплавким по сравнению с кремнием и характеризуется меньшим поверхностным натяжением расплава, что способствует более легкому его вытеснению за границы образца.

### Библиографические ссылки

1. Шиманский В.И., Евдокимов А., Углов В.В., Черенда Н.Н., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. и др. Модификация структуры заэвтектиче-

ского силуминового сплава Al-44Si при воздействии компрессионных плазменных потоков. *Физ. и химия обраб. матер.* 2021; (1): 40-50.

2. Черенда Н.Н., Бибики Н.В., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. Модифицирование поверхностного слоя эвтектического силумина компрессионными плазменными потоками. *Физ. и химия обраб. матер.* 2012; (3): 37-42.
3. Блейхер Г.А., Кривококов В.П. Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц. Новосибирск: Наука, 2014. 248 с.
4. Черенда Н.Н., Ласковнев А.П., Басалай А.В., Углов В.В., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. Эрозия материалов при воздействии компрессионных плазменных потоков. *Перспективные материалы* 2014; (11): 5-14.
5. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. И.К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976. 1008 с.

### References

1. Shimanskiy V.I., Evdokimovs A., Uglov V.V., Cherenda N.N., Astashinskiy V.M., Kuz'mitskiy A.M. i dr. Modifikatsiya struktury zaevtekticheskogo siluminovogo splava Al-44Si pri vozdeystvii kompressionnykh plazmennyykh potokov. [Modification of the structure of the hyper-eutectic silumin alloy Al-44Si under the action of compression plasma flows]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* 2021; (1): 40-50. (In Russian).
2. Cherenda N.N., Bibik N.V., Uglov V.V., Astashinskiy V.M., Kuz'mitskiy A.M. Modifikatsirovanie poverkhnostnogo sloya evtekticheskogo silumina kompressionnymi plazmennymi potokami. [Modification of the surface layer of eutectic silumin by compression plasma flows]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* 2012; (3): 37-42. (In Russian).
3. Bleykher G.A., Krivobokov V.P. Eroziya poverkhnosti tverdogo tela pod deystviem moshchnyykh puchkov zaryazhennykh chastits. Novosibirsk: Nauka, 2014. 248 s. (In Russian).
4. Cherenda N.N., Laskovnev A.P., Basalay A.V., Uglov V.V., Astashinskiy V.M., Kuz'mitskiy A.M. Eroziya materialov pri vozdeystvii kompressionnykh plazmennyykh potokov. [Erosion of materials under the influence of compression plasma flows]. *Perspektivnye materialy* 2014; (11): 5-14. (In Russian).
5. Tablitsy fizicheskikh velichin. Spravochnik. Pod red. akad. I.K.Kikoina. M., Atomizdat, 1976. 1008 p. (In Russian)