

ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ СИЛУМИНА ТИТАНОМ

Е.А. Петрикова¹), Н.А. Прокопенко¹), В.И. Шиманский²)

¹Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской Академии наук,
пр. Академический 2/3, 634055 Томск, Россия, elizmarkova@yahoo.com, nick08_phantom@mail.ru

²Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, shymanskiv@mail.ru

Целью работы является разработка методики кратного повышения механических и трибологических свойств эвтектического силумина АК12М2МgН, заключающейся в электронно-ионно-плазменном легировании поверхностного слоя материала, включающей в себя формирование системы «пленка/подложка» и последующее облучение поверхности интенсивным импульсным электронным пучком. Нанесение покрытия осуществляли на установке лабораторного типа «КВИНТА», последующее облучение поверхности проводилось на установке «СОЛО». В качестве легирующего элемента использовали титан. Толщины напыляемых пленок титана составляли 0,3, 0,5 и 0,7 мкм.

В результате выполненных исследований установлено, что формирование поверхностного сплава приводит к растворению в поверхностном слое включений кремния и интерметаллидов, формированию субмикро- нанокристаллической многофазной структуры, характеризующейся высокими значениями микротвердости и износостойкости, превосходящими соответствующие характеристики исходного силумина в 1,6 и 20 раз.

Ключевые слова: силумин; плазма; импульсный электронный пучок; структура; свойства; легирование.

ELECTRON-ION-PLASMA ALLOYING OF SILUMIN WITH TITANIUM

Elizaveta Petrikova¹), N.A. Prokopenko¹), Vitalii Shymanskii²)

Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (IHCE SB RAS),
2/3 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russia, elizmarkova@yahoo.com, nick08_phantom@mail.ru

Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, shymanskiv@mail.ru

The aim of the work is to develop a technique for increasing the mechanical and tribological properties of eutectic silumin АК12М2МgН, which consists in electron-ion-plasma alloying of the surface layer of the material, including the formation of the film / substrate system and subsequent irradiation of the surface with an intense pulsed electron beam. The coating was carried out on the laboratory setup «QUINTA», the subsequent irradiation of the surface was carried out on the «SOLO» setup. Titanium was used as the alloying element. The thickness of the deposited titanium films was 0,3, 0,5 and 0,7 microns. The morphology of the surface formed as a result of high-speed cooling of the "film (Ti) / (silumin) substrate" system treated with a pulsed electron beam was studied by scanning electron microscopy. The modes were selected in such way that at all energy densities (20–30 J/cm²) the melting of the Ti-AlSi system is fixed. At an energy density of 25 J/cm², the structure of cellular crystallization with crystallite sizes of 0.1–1 μm is formed. Studies performed by micro X-ray spectral analysis have shown that as the electron beam energy density increases, the concentration of aluminum in the surface layer decreases and the concentration of titanium and silicon decreases, indicating that the film-substrate system is mixing. The microhardness of the irradiation surface reaches a maximum value (≈ 2 GPa) after treatment with an electron beam with parameters of 25 J/cm²; 200 μs, 3 imp., 0,3 s⁻¹, with a thickness of the deposited film of 0,5 μm and increases the microhardness of the source material by ~ 60%. It was established that the wear resistance of modified silumin reaches maximum values in a similar mode and exceeds the wear resistance of cast silumin by more than 20 times.

Keywords: silumin; plasma; pulsed electron beam; structure; properties, alloying.

Введение

В настоящее время алюминиевые сплавы широко используются в различных отраслях промышленности. Требования к технологическим свойствам этих сплавов (износостойкость, термостабильность, прочность, коррозионная стойкость и др.) постоянно растут. Система Al-Si служит основой большинства современных алюминиевых литейных сплавов, что связано с благоприятным сочетанием их литейных, механических и ряда специальных эксплуатационных свойств. Имеется множество традиционных способов повышения свойств силуминов. Например, их свойства могут быть существенно улучшены при правильной выработке технологии обработки расплава, термической обработке и определении оптимального состава сплава. Однако удовлетворение всех этих условий не в полной мере решает проблему низкого качества силуминов.

Одним из эффективных направлений улучшения служебных характеристик металлов и сплавов является модификация рабочих поверхностей деталей за счет термоупрочнения и диффузионного насыщения легирующими элементами, при этом резко сокращается расход дефицитных, дорогостоящих материалов и значительно повышается их работоспособность [6]. Одна из особенностей легирования алюминиевых сплавов вытекает из большого различия в температурах плавления подложки и большинства легирующих компонентов. В связи с этим при легировании порошками с высокой температурой плавления при невысоком энерговыкладе довольно часто имеет место неполное растворение и неполное перемешивание присадочных компонентов в легированных зонах.

В последние годы вырос интерес к использованию электронно-пучкового легирования деталей машиностроительного производства, изготовленных из алюминиевых сплавов. Электронно-

пучковое легирование алюминиевых сплавов металлическими компонентами, их смесями и сплавами приводит к повышению эксплуатационных характеристик поверхности. Отличительной особенностью формирования структуры легированных зон алюминиевых сплавов является большая пересыщенность твердого раствора, значительно превосходящая растворимость в равновесных условиях, а также образование интерметаллидов. Анализ научной информации о проведенных экспериментах показывает, что существует реальная возможность электронно-пучкового упрочнения алюминиевых сплавов. Показано, что, изменяя параметры обработки поверхности, можно управлять характеристиками легированных зон: размерами, концентрацией насыщаемых элементов, структурой и микротвердостью материала.

В настоящей работе анализируются экспериментальные результаты, полученные при исследовании фазового состава, структуры и механических свойств поверхностных слоев силумина эвтектического состава, подвергнутого электронно-пучковому легированию, сочетающему нанесение пленки титана (толщина пленки 0,3; 0,5; 0,7 мкм) с последующим облучением высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Материалы и методы исследования

Объектом исследований являлись образцы силумина следующего состава: 12,49 % Si, 2,36 % Mg, 0,6 % Cu, 0,35 % Ni, 0,3 % Fe, ост. Al, (в ат.%). Использовались образцы в виде цилиндров диаметром 10 мм и толщиной 5 мм. В качестве легирующего элемента использовали титан. Толщина напыляемой пленки титана 0,3; 0,5 и 0,7 мкм. Нанесение пленки титана осуществляли на установке лабораторного типа, созданной на базе установки ННВ-6.6-И1 (лаборатория плазменной эмиссионной электроники ИСЭ СО РАН). Электронно-пучковая обработка системы «пленка (Ti) / (силумин) подложка» осуществлялась на установке «СОЛО» по следующему режиму: плотность энергии пучка электронов – 20-30 Дж/см², длительность импульса воздействия – 200 мкс; количество импульсов воздействия – 3; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹. Механические свойства приповерхностного слоя характеризовали путем измерения микротвердости, определяемой по методу Виккерса на приборе ПМТ-3, скорость износа и коэффициент трения измерялись на трибометре TRIBOTester (Франция) (условие сухого трения при комнатной температуре, контртело – шарик ВК8 диаметром 6 мм, радиус трека 2 мм, скорость вращения образца 2,5 см/с, нагрузка на индентор 2 Н). Структуру поверхности обработки исследовали на сканирующем электронном микроскопе SEM-515 Philips, оснащенный микроанализатором EDAX ECON IV. Фазовый состав изучали методами рентгенофазового анализа (прибор Дрон-7).

Результаты и их обсуждение

Методами сканирующей электронной микроскопии исследована морфология поверхности, формирующейся в результате высокоскоростного охлаждения системы «пленка (Ti) / (силумин) подложка», обработанной импульсным электронным

пучком. Режимы были подобраны таким образом, что при всех плотностях энергии (20-30 Дж/см²) фиксируется плавление системы Ti-AlSi. При плотности энергии 25 Дж/см² (при толщинах напыленной пленки 0,3; 0,5; 0,7 мкм) происходит формирование структуры ячеистой кристаллизации с размерами кристаллитов 0,1-1 мкм (рис. 1а). Исследования, выполненные методами микрорентгеноспектрального анализа (рис. 1б), показали, что по мере увеличения плотности энергии пучка электронов, в поверхностном слое возрастает концентрация алюминия и снижается концентрация титана и кремния, что свидетельствует о перемешивании системы «пленка-подложка».

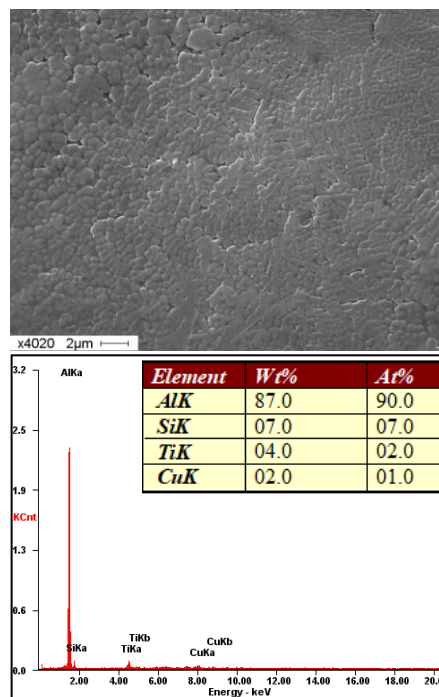


Рис. 1. Структура поверхности силумина марки АК12М2МgН после электронно-пучкового легирования титаном (толщина пленки Ti 0,5 мкм, параметры облучения: 25 Дж/см²; 200 мкс, 3 имп., 0,3 с⁻¹).

Fig. 1. Silumin grade АК12М2МgН surface structure after electron-beam alloying with titanium (Ti film thickness 0.5 μm, irradiation parameters: 25 J / cm²; 200 μs, 3 imp., 0.3 s⁻¹).

Выполнен анализ микротвердости поверхности силумина, легированной путем облучения системы «пленка/подложка» интенсивным импульсным электронным пучком и показано, что электронно-пучковая обработка в указанном интервале параметров облучения приводит к незначительному упрочнению поверхностного слоя. Микротвердость поверхности облучения достигает максимального значения (≈ 2 ГПа) после обработки электронным пучком с параметрами 25 Дж/см²; 200 мкс, 3 имп., 0,3 с⁻¹, при толщине напыленной пленки 0,5 мкм и увеличивает микротвердость исходного материала на ~60 %.

Установлено, что износостойкость модифицированного силумина достигает максимальных значений в аналогичном режиме и превышает износостойкость исходного материала.

стойкость литого силумина более чем в 20 раз (рис. 2).

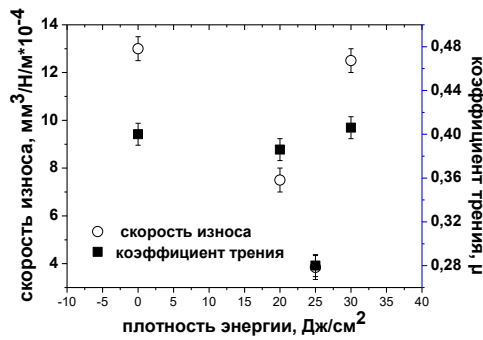


Рис. 2. Зависимость скорости износа и коэффициента трения от плотности энергии воздействия пучка, при прочих равных параметрах 200 мкс, 3 имп., 0.3 с⁻¹ и толщине осажденной пленки 0.5 мкм

Fig. 2. The wear rate and friction coefficient dependence on the energy density of the beam, with other things being equal, 200 μs, 3 imp., 0.3 s⁻¹ and the thickness of the deposited film 0.5 μm

Таблица 1. Структурные характеристики поверхностного слоя сплава на основе AlSi (на поверхность сплава напылили титан толщиной 0.7 мкм и провели электронно-пучковую обработку)

Table 1. Structural characteristics of the surface layer of the AlSi-based alloy (titanium 0.7 μm thick was deposited onto the surface of the alloy and electron beam treatment was carried out)

Образец	Вторичные фазы	Содержание вторичных фаз
TiSiAl_20	TiAl ₃ Ti ₁₅ Al ₇ Si ₁₂ Al ₃ Mg ₂ Al ₂ Mg	1-2%
TiSiAl_25	TiAl ₃ Ti ₁₅ Al ₇ Si ₁₂ Al ₃ Mg ₂ Al ₂ Mg	1-2% < 1%
TiSiAl_30	TiAl ₃ Ti ₁₅ Al ₇ Si ₁₂ Al ₃ Mg ₂ Al ₂ Mg	1-2% < 1%

Исследования фазового состава поверхностного слоя силумина, подвергнутого комплексной обработке (напыление титана + облучение электронным пучком), осуществляли методами рентгеноструктурного анализа. Изучение рентгенограмм дает основание заключить, что использованная в настоящей работе комплексная обработка сопровождается формированием в поверхностном слое силумина многофазной структуры. Наряду с фазами исходной структуры (твердые растворы на ос-

нове алюминия и кремния), присутствуют в малом количестве фазы, представленными в таблице 1.

Заключение

Разработана комплексная методика, позволяющаякратно повысить механические и трибологические свойства силумина, а именно: микротвердость в 1.6 раза и износостойкость более чем в 20 раз, а также снизить коэффициент трения (с 0.4 до 0.18), сочетающая формирование системы «пленка (титан)/(силумин) подложка» и последующее облучение интенсивным импульсным электронным пучком.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-52-04009 Бел_мол_a).

Библиографические ссылки

1. Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом. Новосибирск: Наука; 2018. 176 с.
2. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Москва: Металлургия; 1979. 640 с.
3. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. Москва: МИСиС; 2010. 511 с.
4. Makhloufe M.M., Guthy H.V. The aluminum-silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. *Journal of Light Metals* 2001; 1(4): 199–218.
5. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под общ. ред. Н.Н. Ковалы и Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ; 2016. 312 с.
6. Белов Н. А., Савченко С.В., Хван А.В. Фазовый состав и структура силуминов. Москва: МИСИС; 2008. 282 с.

References

1. Ozur G.E., Proskurovskiy D.I. Istochniki nizkoenergeticheskikh sil'notochnykh elektronnykh puchkov s plazmennym anodom [Sources of low-energy high-current electron beams with a plasma anode] Novosibirsk: Nauka, 2018. 176 p. (In Russian).
2. Mondolfo L.F. Struktura i svoystva alyuminiyevykh splyavov. [Structure and properties of aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya; 1979. 640 p. (In Russian).
3. Belov N.A. Fazovyy sostav promyshlennykh i perspektivnykh alyuminiyevykh splyavov. [Phase composition of industrial and advanced aluminum alloys]. Moscow: MISIS; 2010. 511 p. (In Russian).
4. Makhloufe M.M., Guthy H.V. The aluminum-silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. *Journal of Light Metals* 2001; 1(4): 199–218.
5. Elektronno-ionno-plazmennaya modifikatsiya poverkhnosti tsvetnykh metallov i splyavov [Electron-ion-plasma modification of the surface of non-ferrous metals and alloys] / pod obshch. red. N.N. Kovalya i YU.F. Ivanova. Tomsk: Izd-vo NTL; 2016. 312 p. (In Russian).
6. Belov N. A., Savchenko S.V., Khvan A.V. Fazovyy sostav i struktura siluminov [Phase composition and structure of siluminov]. Moscow: MISIS; 2008. 282 p. (in Russian).