

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СИЛУМИНА, ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОМУ МНОГОЦИКЛОВОМУ МОДИФИЦИРОВАНИЮ

Ю.Ф. Иванов, И.В. Лопатин, О.С. Толкачев, М.Е. Рыгина

*Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской Академии наук,
пр. Академический 2/3, 634055 Томск, Россия,
yufi55@mail.ru, lopatin@opeee.hcei.tsc.ru, elizmarkova@yahoo.com, ole.ts@mail.ru, l-7755me@mail.ru*

Целью работы является разработка методики кратного повышения механических и трибологических свойств сплава Al-Si, заключающейся в многоцикловогой обработке в едином вакуумном пространстве поверхностного слоя материала, сочетающей в одном цикле формирование системы «пленка (металл)/(силумин) подложка» и последующее облучение поверхности интенсивным импульсным электронным пучком. В качестве материала исследований был использован сплав Al-Si марки АК12. Обработку силумина проводили на установке «КОМПЛЕКС». В качестве легирующего элемента использовали титан. Толщина напыляемой пленки титана в каждом цикле обработки 0.5 мкм. Количество циклов легирования 1, 5 и 10. Процесс поверхностного легирования заключался в последовательной реализации следующих видов обработки материала: ионная очистка и нагрев в аргоновой плазме несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым и полым катодом с подачей отрицательного смещения на образец (начальный нагрев образцов до заданной температуры, очистка и активация обрабатываемой поверхности); плазмо-ассистированное электродуговое нанесение металлической (при использовании аргоновой плазмы) пленки; электронно-пучковая обработка системы «пленка (титан)/(силумин) подложка» с использованием низкоэнергетичного интенсивного импульсного электронного пучка микросекундной длительности. В результате выполненных исследований установлено, что многоциклового легирование силумина титаном приводит к растворению в поверхностном слое толщиной до 50 мкм включений кремния и интерметаллидов, формированию субмикро- нанокристаллической многофазной структуры, характеризующейся высокими значениями микротвердости и износостойкости, превосходящими соответствующие характеристики литого силумина в 1.4 и 15 раз.

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

STRUCTURE AND PROPERTIES OF SILUMIN AFTER ELECTRON-ION-PLASMA MULTY-CYCLE MODIFICATION

Yu.F. Ivanov, I.V. Lopatin, O.S. Tolkachev, M.E. Rygina

*Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (IHCE SB RAS),
2/3 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russia
yufi55@mail.ru, lopatin@opeee.hcei.tsc.ru, elizmarkova@yahoo.com, ole.ts@mail.ru, l-7755me@mail.ru*

Low cost and adaptability of silumin allows its intensive using in various industries. The hardness and wear resistance of silumin are increasing with silicon concentration increasing in the alloy, however, this increases the fragility of the material. The aim of the work is to develop a technique for multiplying of the mechanical and tribological properties of an Al-Si alloy. The technique combines the formation of the "film (metal)/(silumin) substrate" system with the subsequent surface irradiation by the intense pulsed electron beam in the one vacuum cycle. The research material was used AK12 Al-Si alloy. The silumin processing of was carried out on the "COMPLEX" setup. Titanium was used as the alloying element. The titanium deposited film thickness in each processing cycle was 0.5 microns. The number of cycles of doping 1, 5 and 10. The process of the surface alloying is consisted of the sequential implementation of the following types of material processing: ion cleaning and heating in an argon plasma of a non-self-sustained arc discharge with thermionic and hollow cathodes and specimens negative biasing (initial specimens heating, cleaning and treated surface activation); plasma-assisted (using argon plasma) vacuum arc deposition of the metal film; electron-beam processing of the "film (titanium)/substrate (silumin)" system by low-energy intense pulsed electron beam with a duration of tens of microseconds. As a result of the studies, it was established that multi-cycle titanium alloying of silumin leads to silicon and intermetallic inclusions dissolution in the surface layer up to 50 μm thick, forming a submicro- and nano- crystalline multiphase structure. Along with the initial state phases (aluminum and silicon), the structure contains titanium aluminides (TiAl and TiAl₃), the number of which reaches up to 56 wt. %. The modified material is characterized by high values of microhardness and wear resistance, which exceed the corresponding characteristics of cast siluminin by 1.4 and 15 times.

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

Введение

Силумины – это сплавы на основе алюминия с кремнием. Содержание кремния в готовом изделии из силумина, как правило, изменяется в пределах от 4 % до 22 % от общего объема [1, 2]. Силумины в настоящее время являются одним из наиболее востребованных сплавов на основе алюминия. Низкая стоимость в сочетании с технологичностью дает возможность широко использовать силумины в промышленности. Изделия из силуминов применяются в машиностроении (поршни, детали для корпуса, цилиндры двигателя), авиастроении (бло-

ки цилиндров, поршни для охлаждения, авиационные узлы), аэрокосмической технике (детали с низким значением температурного коэффициента линейного расширения и высоким уровнем механических свойств), при изготовлении газотурбинного оборудования (генераторы, теплообменники) и многие другие области современной промышленности [1, 2]. Служебные характеристики силумина во многом определяются концентрацией в сплаве кремния. Чем выше процент содержания кремния, тем более твердым и износостойким получается сплав, однако, при этом повышается хрупкость де-

тали и изделия. Последнее обусловлено формированием на стадии кристаллизации сплава включений игольчатой (пластинчатой) формы кремния и интерметаллидов больших (сотни микрометров) размеров, присутствие микро- и макропор [3].

Целью настоящей работы является разработка методики кратного повышения механических и трибологических свойств сплава Al-Si, заключающейся в многоцикловой обработке в едином вакуумном пространстве поверхностного слоя материала, сочетающей в одном цикле формирование системы «пленка (металл)/(силумин) подложка» и последующее облучение поверхности интенсивным импульсным электронным пучком субмиллисекундной длительности.

Материалы и методы исследования

В качестве материала исследований был использован сплав Al-Si марки АК12 (ГОСТ 1583-93), относящийся к эвтектическому силумину и имеющий следующий химический состав (вес. %): (10-13)Si -до 1.5Fe -до 0.5Mn -до 0.1Ti -до 0.6Cu -до 0.1Zr -до 0.1Mg -до 0.3Zn (Al – основа, процентное содержание Al (84.3-90). Образцы имели форму пластинок размерами 20x20x8 мм. Перед модифицированием (далее по тексту: «исходное состояние») силумин находился в литом (литье в кокиль) состоянии. Обработку силумина проводили на установке «КОМПЛЕКС», спроектированной и изготовленной в ИСЭ СО РАН [4]. Данная установка позволяет реализовывать в разных комбинациях в едином вакуумном пространстве следующие виды обработки поверхности: ионную очистку и нагрев в аргоновой плазме несамостоятельного дугового разряда с накаливаемым и полым катодами с подачей отрицательного смещения на образец (начальный нагрев образцов до заданной температуры, очистка и активация обрабатываемой поверхности); плазмо-ассистированное электродуговое нанесение металлических (при использовании аргоновой плазмы) пленок или керамических твердых и сверхтвердых покрытий (при использовании реакционно способной плазмы); электронно-пучковую обработку низкоэнергетичным интенсивным импульсным электронным пучком микро- субмиллисекундной длительности воздействия; насыщение поверхностного слоя модифицируемого материала газовыми элементами (азот, углерод, кислород). В качестве легирующего элемента использовали титан. Толщина напыляемой пленки титана в каждом цикле обработки 0.5 мкм. Количество циклов легирования 1, 5 и 10.

Исследование структуры силумина в исходном состоянии и после модифицирования осуществляли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD 6000), оптической (микровизор металлографический μ Vizo-MET-221), сканирующей (прибор SEM 515 Philips) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100F) электронной микроскопии. Анализ элементного состава образцов осуществляли методами SEM (STEM)/EDAX. Свойства модифицированного слоя характеризовали, определяя микротвердость (прибор ПМТ-3, нагрузка на индентор 0.5 Н) и износостойкость (прибор TRIBOtechnik; условие сухого трения при комнатной температуре, контртело – шарик ШХ15

диаметром 6 мм, диаметр трека 4 мм, скорость вращения образца 2.5 см/с, нагрузка на индентор 5 Н, количество оборотов 8000). Износостойкость поверхностного слоя материала рассчитывали после проведения профилометрии образовавшегося трека.

Результаты и их обсуждение

Сплав АК12 в литом состоянии, как показали исследования, выполненные методами оптической и сканирующей электронной микроскопии, является многоэлементным многофазным материалом, характеризующимся присутствием крупных кристаллов кремния и включений интерметаллидов преимущественно пластинчатой (игольчатой) формы, размеры которых изменяются в пределах от единиц до сотен микрометров (рис. 1). Наличие таких включений является основной причиной весьма низкой пластичности и высокой хрупкости данного материала.

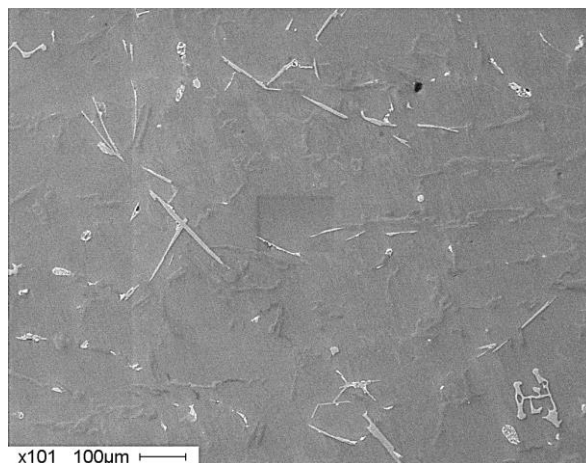


Рис. 1. Структура литого силумина марки АК12

Fig. 1. The structure of cast silumin brand AK12

Многоцикловое легирование силумина титаном приводит к растворению в поверхностном слое толщиной до 50 мкм включений кремния и интерметаллидов. На поверхности образца формируется субмикро- нанокристаллическая структура высокоскоростной кристаллизации (рис. 2). Средний размер кристаллитов данной структуры растет с увеличением количества циклов от 570 нм (1 цикл модифицирования) до 720 нм (10 циклов модифицирования).

Методами рентгенофазового анализа установлено, что после 5 и 10 циклов «напыления-облучения» в поверхностном слое силумина формируется многофазная структура, содержащая, наряду с фазами исходного состояния (алюминий и кремний), алюминиды титана состава $TiAl$ и $TiAl_3$. Относительное содержание алюминидов достигает максимального значения после 5 циклов обработки и суммарно составляет 56 масс. %.

Исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры силумина после многоцикловой обработки изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Установлено, что в поверхностном слое формируется градиентная структура, эле-

ментный и фазовый состав, размеры структурных составляющих которой существенным образом зависят от расстояния до поверхности модифицирования (рис. 3). Размеры частиц упрочняющих фаз изменяются в пределах от 10 нм до 370 нм (рис. 3 и рис. 4).

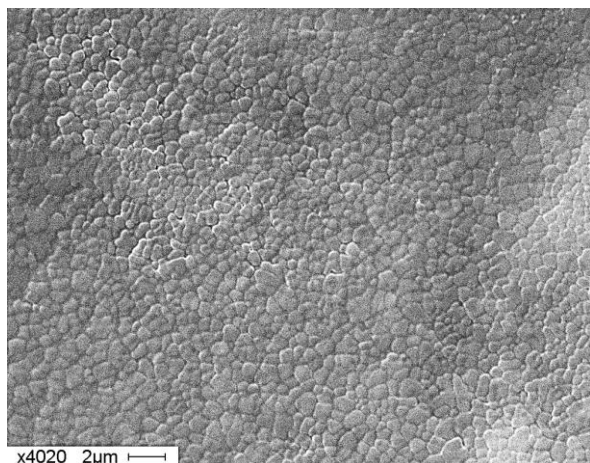


Рис. 2. Структура поверхности литого силумина марки АК12 после 5 циклов модифицирования

Fig. 2. The surface structure of cast silumin brand AK12 after 5 cycles of modification

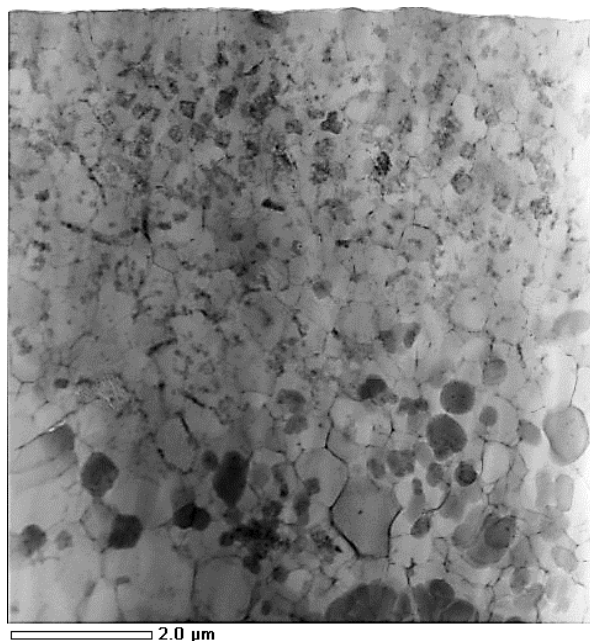


Рис. 3. Структура поверхностного слоя литого силумина марки АК12 после 5 циклов модифицирования

Fig. 3. Structure of the surface layer of cast force-mine mark AK12 after 5 cycles of modification

Установлено, что износостойкость модифицированного силумина достигает максимальных значений после пяти циклов обработки и превышает износостойкость литого силумина более чем в 14 раз. Твердость силумина после модифицирования изменяется менее значимым образом и превышает после пяти циклов модифицирования в 1.4 раза твердость литого силумина.

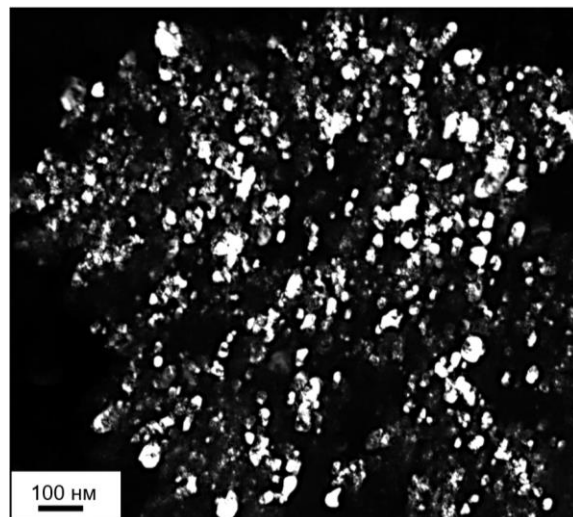


Рис. 4. Темнопольное изображение структуры поверхностного слоя литого силумина марки АК12 после 10 циклов модифицирования

Fig. 4. Dark-field image of the structure of the surface layer of cast silumin brand AK12 after 10 cycles of modification

Заключение

Разработана методика кратного повышения трибологических свойств силумина, заключающаяся в многоцикловой обработке в едином вакуумном пространстве поверхностного слоя материала, сочетающей в одном цикле формирование системы «пленка (металл)/(силумин) подложка» и последующее облучение поверхности интенсивным импульсным электронным пучком.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 19-19-00183).

Библиографические ссылки

1. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. Москва: Металлургия; 1979. 640 с.
2. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. Москва: МИСиС; 2010. 511 с.
3. Makhloufe M.M., Guthy H.V. The aluminum-silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. *Journal of Light Metals* 2001; 1(4): 199-218.
4. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под общ. ред. Н.Н. Ковалева и Ю.Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ; 2016. 312 с.

References

1. Mondol'fo L.F. Struktura i svoystva alyuminiyevykh splyavov. [Structure and properties of aluminum alloys]. Moscow: Metallurgiya; 1979. 640 p. (In Russian).
2. Belov N.A. Fazovyy sostav promyshlennykh i perspektivnykh alyuminiyevykh splyavov. [Phase composition of industrial and advanced aluminum alloys]. Moscow: MISiS; 2010. 511 s. (In Russian).
3. Makhloufe M.M., Guthy H.V. The aluminum-silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography. *Journal of Light Metals* 2001; 1(4): 199-218.
4. 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).