

СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СИЛУМИНА, ФОРМИРУЮЩАЯСЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ

Ю.Ф. Иванов¹⁾, А.П. Ласковнев²⁾, Н.Н. Черенда³⁾, Е.А. Маркова¹⁾, А.Д. Тересов¹⁾,
Ю.А. Колубаева¹⁾, Е.А. Будовских⁴⁾

¹⁾Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия, тел. (3822)49-17-13,
факс: (3822)49-24-10, e-mail: yufi55@mail.ru

²⁾Физико-технический институт НАНБ,
ул. Купревича, 10, 220141, Минск, e-mail: phti@tut.by

³⁾Белорусский государственный университет,

пр. Независимости, 4, 220030, Минск, e-mail: cherenda@bsu.by

⁴⁾Сибирский государственный индустриальный университет
ул. Кирова, 42, 654007, Россия, e-mail: budovskih_ea@physics.sibsibsu.ru

Осуществлена обработка поверхности силумина концентрированными потоками энергии (высокоинтенсивный электронный пучок, плазма электрического взрыва проводника). Выполнен анализ и выявлены режимы воздействия,кратно повышающие микротвердости и износостойкости модифицированного материала. Методами рентгенофазового анализа и электронной микроскопии (сканирующей и дифракционной просвечивающей) проведены исследования структуры и фазового состава поверхностного слоя силумина; выявлены механизмы, объясняющие физическую природу повышения свойств модифицированного материала.

Введение

Эффективным направлением улучшения служебных характеристик металлов и сплавов является модификация рабочих поверхностей деталей за счет термоупрочнения и диффузионного насыщения легирующими элементами: резко сокращается расход дефицитных и дорогих материалов, эффект повышения работоспособности оказывается значительным [1, 2]. Цель настоящей работы – выявление закономерностей формирования структуры и свойств поверхностного слоя силумина при электронно-ионно-плазменной обработке, включающей облучение электронным пучком, обработку плазмой газового разряда и электрического взрыва проводника.

Материал, методы модификации и методика исследования

Объектом исследований являлись образцы силумина состава: 12.49 % Si, 2.36 % Mg, 0.6 % Cu, 0.35 % Ni, 0.3 % Fe, ост. Al (в ат. %). Образцы в виде цилиндров диаметром 10 мм и толщиной 5 мм подвергали обработке высокоинтенсивным импульсным электронным пучком на установке «SOLO» (Институт сильноточной электроники СО РАН). Параметры электронно-пучковой обработки: плотность энергии пучка электронов $E_s = 10-30$ Дж/см², длительность импульса воздействия пучка электронов $\tau = 50-200$ мкс, частота следования и количество импульсов облучения $f = 0,3$ Гц, $N = 1-50$. Облучение проводили в среде аргона. Параметры электровзрывного легирования: время воздействия $t_l = 100$ мкс; плотность мощности $q = 8,2$ ГВт/м², давление плазмы в ударно-сжатом слое $p = 18,8$ МПа, толщина взрываеваемой фольги титана 20 мкм и масса 90 мг. В отдельных экспериментах в области

взрыва на фольге титана размещали порошковую навеску бора массой 90 мг. Для части образцов на поверхность силумина напыляли пленку титана толщиной ~1 мкм. Нанесение покрытия осуществляли на лабораторной установке, созданной на базе установки ННВ-6.6-И1. Механические свойства приповерхностного слоя характеризовали путем определения микротвердости (метод Виккерса, прибор ПМТ-3). Структуру поверхности обработки и приповерхностного слоя анализировали на сканирующем электронном микроскопе SEM-515 Philips, оснащенный микроанализатором EDAX ECON IV и просвечивающем электронном микроскопе ЭМ-125. Фазовый состав изучали методами рентгеноструктурного анализа (Дрон-7).

Результаты исследования и их обсуждение

В результате выполненных исследований установлено, что облучение образцов силумина высокоинтенсивными электронными пучками субмиллисекундной длительности воздействия на установке «SOLO» приводит, во-первых, к насыщению кристаллической решетки алюминия легирующими элементами с формированием твердого раствора замещения, во-вторых, к перераспределению легирующих элементов по толщине модифицированного слоя, в-третьих, к диспергированию структуры поверхностного слоя вплоть до наноструктурного состояния – средние поперечные размеры прослоек кремния в структуре ячеистой кристаллизации составляют ~50 нм (рис. 1) и, в-четвертых, к увеличению микротвердости поверхностного слоя (по отношению к сердцевине) при оптимальном режиме облучения (20 Дж/см²; 150 мкс; 3 имп.; 0,3 Гц) в ~1,5 раза.

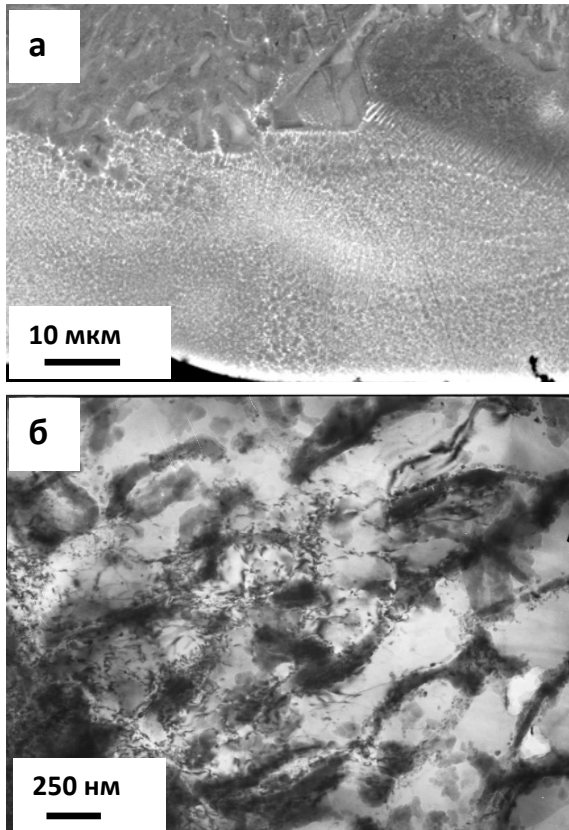


Рис. 1. Структура, формирующаяся в поверхностном слое силумина в результате высокоскоростного плавления и кристаллизации, инициированных облучением электронным пучком; а – сканирующая электронная микроскопия поперечного шлифа; б – просвечивающая электронная микроскопия.

Комплексная обработка, сочетающая вакуум-

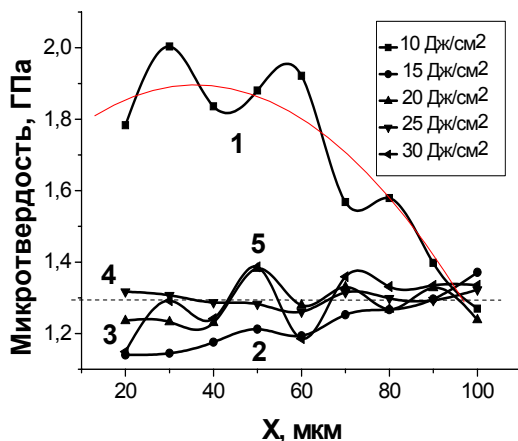


Рис. 2. Профиль микротвердости силумина, подвергнутого комплексной обработке, сочетающей напыление пленки титана и последующую электронно-пучковую обработку (200 мкс, 5 имп, 0,3 Гц) при плотности энергии пучка электронов: 10 Дж/см² (кривая 1), 15 Дж/см² (2), 20 Дж/см² (3), 25 Дж/см² (4), 30 Дж/см² (5). Горизонтальной линией указана микротвердость исходного материала.

но -дуговое нанесение покрытия титана (пленка толщиной ~1 мкм) и последующую электронно-пучковую обработку при плотности энергии пучка электронов ~10 Дж/см² приводит к формированию приповерхностного слоя толщиной ~80 мкм, микротвердость которого постепенно снижается по мере удаления от поверхности обработки (рис. 2). Твердость приповерхностного слоя толщиной ~60 мкм превышает твердость объема материала на ~50%. Облучение электронным пучком при большей величине плотности энергии пучка электронов (15 – 30 Дж/см²) практически не изменяет микротвердость поверхностного слоя силумина.

Комбинированная обработка образцов силумина, заключающаяся в модификации поверхности потоком плазмы, формирующейся при электрическом взрыве фольги титана и последующем облучении высокоинтенсивными электронными пучками субмиллисекундной длительности воздействия на установке «SOLO» приводит к формированию многофазной структуры и сопровождается при оптимальном режиме облучения (30 Дж/см², 150 мкс, 5 имп, 0,3 Гц) формированием поверхностного слоя толщиной ~90 мкм, микротвердость которого в 2,5..5,0 раз превышает микротвердость сердцевины образца (рис. 3).

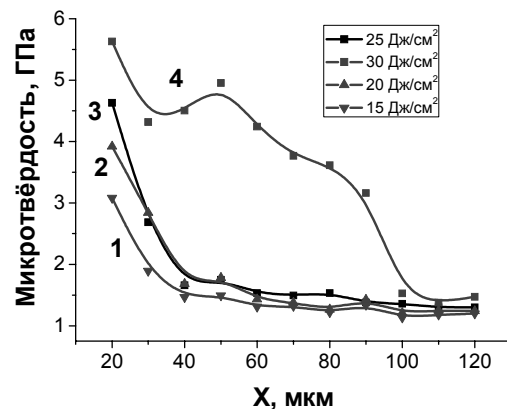


Рис. 3. Профили микротвердости силумина, подвергнутого ЭВЛ и последующему электронно-пучковому облучению (150 мкс, 5 имп, 0,3 Гц) при различной плотности энергии пучка электронов.

Легирование поверхности силумина плазмой, формирующейся при электрическом взрыве фольги титана с навеской порошка бора, сопровождается образованием многослойной структуры – неоднородного по толщине высокопористого покрытия, слоя жидкофазного легирования и слоя термического влияния. Показано, что электро-взрывное легирование приводит к увеличению микротвердости слоя толщиной до 170 мкм. После электронно-пучковой обработки поверхности образцов силумина выявлено существенное снижение степени шероховатости поверхностного слоя, снижение коэффициента трения в 5..6 раз при превышении микротвердости поверхностного слоя толщиной ~100 мкм в 2,5..5,5 раз по отношению к исходному материалу при оптимальном

режиме электронно-пучковой обработки (25 Дж/см², 150 мкс, 5 имп, 0,3 Гц) (рис. 4).

Выполнены исследования фазового состава и дефектной субструктуры и установлено, что ком-

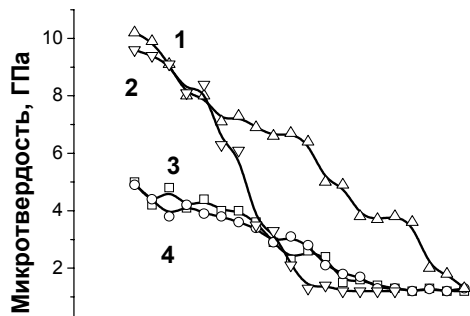


Рис. 4. Профили микротвердости силумина, подвергнутого ЭВЛ (Ti+B) (кривая 1) и последующему электронно-пучковому облучению (150 мкс, 5 имп, 0,3 Гц): 2 – 30; 3 – 25; 4 – 20 Дж/см².

плексная обработка приводит к существенному измельчению зеренной структуры алюминия (вплоть до субмикронных значений) и пластин кремния (рис. 5), формированию наноразмерных частиц интерметаллидов и боридов.

Заключение

Осуществлена обработка поверхности силумина концентрированными потоками энергии (высокоинтенсивный электронный пучок, плазма электрического взрыва проводника). Выполнен анализ и выявлены режимы воздействия, кратно повышающие микротвердости и износостойкости модифицированного материала. Методами рентгенофазового анализа и электронной микроскопии (сканирующей и дифракционной просвечивающей) проведены исследования структуры и фазового состава поверхностного слоя силумина. Показано, что повышения свойств модифицированного слоя материал обусловлено измельчением структуры материала вплоть до субмикронного размера, выделением упрочняющих частиц вторых фаз наноразмерного диапазона.

STRUCTURE OF THE SURFACE LAYER OF SILUMIN FORMED BY ELECTRON-ION-PLASMA TREATMENT

Y.F. Ivanov¹, A.P. Laskovnev², N.N. Cherenda³, E.A. Markova¹, A.D. Teresov¹,
Y.A. Kolubaeva¹, E.A. Budovskih⁴, N.N. Koval¹

¹Institute of high current electronic SB RAS, 634055, Russia, Tomsk, ave. Academical, 2/3, phone: (3822)49-24-10, E-mail: yufi55@mail.ru

²Physicotechnical institute NASB, 220141, Belarus, Minsk, Kuprevicha, 10; e-mail: phti@tut.by

³Byelarusian State University, 220030, Minsk, ave. Nezavisimosti, 4; e-mail: cherenda@bsu.by

⁴Siberian State Industrial University, 654007, Russia, Tomsk, Kirova, 42,
e-mail: budovskih_ea@physics.sibsu.ru

In present work the treatment of silumin by concentrated energy fluxes (high-intensity electron beam, plasma of electrical explosion of conductor) has been carried out. The analysis of treatment conditions has been fulfilled and the modes of treatment have been determined leading to a dramatic improvement of microhardness and wear-resistance of modified material. The structure and phase composition of surface layer have been studied by the methods of X-ray diffraction and electron microscopy both scanning and diffraction transmission. The mechanisms responsible for improvement of properties of modified material have been revealed.

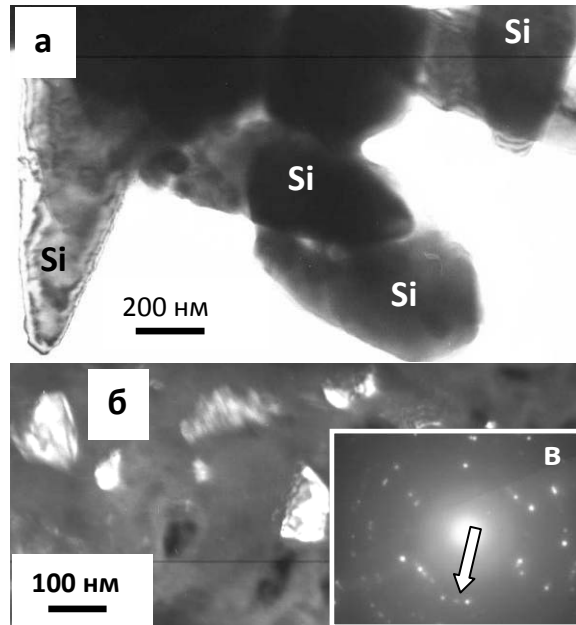


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина, подвергнутого электровзрывному легированию (Ti+B) и последующей электронно-пучковой обработке. Слой, расположенный на глубине 50 мкм; а – светлое поле; б – темное поле, полученное в рефлексах типа [002]Al; в – микроэлектронграмма к (б) (стрелкой указаны рефлексы, в которых получено темное поле).

Список литературы

1. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки металлов. – М.: Круглый год, 2001. – 528 с.

2. Кадыржанов К.К., Комаров Ф.Ф., Погребняк А.Д., Русаков В.С., Туркебаев Т.Э. Ионно-лучевая и ионно-плазменная модификация материалов. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 640 с.