

Литература.

1. Herman G.T., Fundamentals of Computerized Tomography: Image Reconstruction from Projections, Springer Publishing Company, New York, 2009.
2. Kak A.C., Slaney M., Principles of Computerized Tomographic Imaging, SIAM, Philadelphia 2001, 60p.
3. Оздиев А.Х., Модифицированный алгоритм обратного проецирования для томографической реконструкции при сканировании образца с пошаговым сдвигом // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2016) – Томск, 2016 – С. 433–434.

МОДИФИЦИРОВАНИЕ СИЛУМИНА ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫМ МЕТОДОМ

Н.Н. Морозова¹, А.А. Клопотов^{1,2}, д.ф.-м.н., проф., Ю.Ф. Иванов^{1,3}, д.ф.-м.н., проф.

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина 30, тел. (3822)-42-72-42*

² *Томский государственный архитектурно-строительный университет
634002, г. Томск, пл. Соляная, 2, тел. (3822)-65-04-78*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет,
634055, Томск 634050, пр. Ленина 36*

³ *Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/3, тел. (3822)-49-17-13*

E-mail: klopotovaa@tsuab.ru

Аннотация: Осуществлено модифицирование поверхности силумина марки АК12 плазмой, формирующейся при электрическом взрыве фольги алюминия с помещенной в область взрыва навеской порошка оксида иттрия (метод электровзрывного легирования). Выполнен термодинамический анализ системы Al-Si-Y-O, выявлены фазы, формирующиеся в данной системе в равновесных условиях. Осуществлены трибологические испытания модифицированного материала и выявлены режимы обработки, позволяющие многократно повысить износостойкость силумина.

Abstract: The modification of the surface of the silumin of the AK12 grade by the plasma formed during the electrical explosion of the aluminum foil with the yttrium oxide powder placed in the explosion region (the method of electric explosive doping) was carried out. The thermodynamic analysis of the Al-Si-Y-O system was carried out, the phases formed in this system under equilibrium conditions were revealed. Tribological tests of the modified material have been carried out and processing regimes have been identified, which allow many times to increase the wear resistance of silumin.

В настоящее время широкое распространение получили методы обработки металлов и сплавов, основанные на использовании концентрированных потоков энергии (потоки плазмы, мощные ионные и электронов пучки, лучи лазера и т.д.) [1-3]. Импульсное оплавление с одновременным насыщением поверхностных слоев материала легирующими элементами с последующей высокоскоростной кристаллизацией и образованием упрочняющих фаз, осуществляемое плазмой, формирующейся при электрическом взрыве токопроводящего материала (электровзрывное легирование, ЭВЛ), является одним из перспективных методов модификации структуры и свойств металлов и сплавов [4, 5]. Электровзрывное легирование металлов и сплавов осуществляется при импульсном воздействии на поверхность многофазных плазменных струй, сформированных при электрическом взрыве проводников. Продукты электрического взрыва представляют собой многофазную систему, включающую как плазменный компонент, так и конденсированные частицы различной дисперсности [6].

Целью работы являлся анализ фазообразования, структуры и свойств поверхностного слоя силумина, подвергнутого электровзрывному легированию.

В качестве материала исследования выбран силумин марки АК12 состава 12.5 % Si, 2.36 % Mg, 0.6 % Cu, 0.35 % Ni, 0.3 % Fe, ост. Al (ат. %). ЭВЛ (время воздействия ~100 мкс, ускоряющее напряжение 2,6 кВ, масса взрывающей фольги алюминия 0,0589 г, масса порошка оксида иттрия 0,0589 г) силумина осуществляли на установке лабораторного типа ЭВУ 60/10. Исследование структуры модифицированного слоя проводили методами сканирующей и просвечивающей дифракционной электронной микроскопии. Свойства поверхностного слоя характеризовали величиной коэффициента изнашивания.

Легирование силумина электровзрывным методом сопровождается воздействием на поверхность материала потоком плазмы, содержащей элементы фольги и навески порошка, а именно, алюминий, иттрий и кислород. Таким образом, в поверхностном слое силумина формируется многоэле-

ментный сплав, в состав которого входят атомы алюминия, кремния, иттрия и кислорода. Ниже представлен анализ фаз, формирующихся в системе Al-Si-Y в равновесных условиях.

Система Al-Si. Система Al-Si относится к простому эвтектическому типу с небольшой растворимостью компонентов друг в друге в твердом состоянии [7]. Максимальная растворимость Si в твердом Al наблюдается при эвтектической температуре 577 °С и равна 1,5±0,1 ат. % (ат.). Максимальное значение растворимости Al в Si незначительна и равна 0,016±0,003 ат. % при температуре 1190 °С.

Система Al-Y. В системе Al-Y формируется пять интерметаллических соединений (Al₃Y, Al₂Y, AlY, Al₂Y₃ и AlY₂), которые образуются в результате разных реакций (табл. 1). Соединения Al₂Y и Al₂Y₃ плавятся конгруэнтно при температурах 1485 °С и 1100 °С, соответственно. Соединения Al₃Y, AlY и AlY₂ образуются по перитектическим реакциям при температурах 980 °С, 1130 °С и 985 °С, соответственно. В системе имеют место две эвтектических реакции: L↔(Al) + Al₃Y и L↔(Y) + AlY₂ при температурах 639 °С и 960 °С соответственно. Растворимость Y в Al невысока. Максимальная растворимость Y в Al равна 0,052 % (ат.) [7].

Система Si-Y. В системе Si-Y установлено существование пяти интерметаллических соединений: Y₅Si₃, Y₅Si₄, YSi, YSi_{2-x} (YSi_{1,56}) и YSi₂ (табл. 1). Из этих соединений только одно (Y₅Si₃) плавится конгруэнтно при температуре 1875 °С. Соединение YSi₂ в системе Si-Y является метастабильным. В системе наблюдаются два эвтектических превращения: L↔Y₃Si₅+(Si) и L↔(αY)+Y₅Si₃ при температурах 1230 °С и 1260 °С соответственно [7].

Система Al-Si-Y. В системе Al-Si-Y из трех сплавообразующих элементов кремний относят к неметаллам, поскольку атом кремния довольно легко присоединяет еще четыре электрона, что и характеризует его как неметалл. Атомы Si имеют четыре электрона на внешних s- и p- оболочках – [Ne]3s²3p². Другие два сплавообразующих элемента в этой системе являются металлами и обладают кардинально отличными электронными конфигурациями: Al – [Ne]3s²3p¹ и Y – [Kr] 5d¹6s². Это отражает важную роль электронных факторов в проблеме стабильности и образования интерметаллических соединений на основе данных элементов.

Таблица 1.

Составы и кристаллические структуры бинарных Al-Si, Si-Y и тройных интерметаллических соединений Al-Si-Y

Состав, температурная область, °С	Символ Пирсона / Пространств. группа	Прототип	Параметры элементарной ячейки, нм			Литература
			a	b	c	
Al-Y						
YAl ₃ (h) <980	hR12	BaPb ₃	0.6204	–	2.1184	[8]
YAl ₂ <1485	cF24	Cu ₂ Mg	0.7855(2)	–	–	[8]
YAl <1130	oC8	CrB	0.3884(2)	1.1520(9)	0.4385(2)	[8]
Y ₃ Al ₂ <1100	tP20	Gd ₃ Al ₂	0.8232(4)	–	0.7632(8)	[8]
Y ₂ Al <985	oP12	Co ₃ Si	0.6636(6)	0.5086(2)	0.9471(2)	[8]
Y-Si						
Y ₅ Si ₃ <1850	hP16	Mn ₅ Si ₄	0.8403	–	0.6303	[9, 10]
Y ₅ Si ₄ <1840	oP36	Sn ₅ Ge ₄	0.739	1.452	0.764	[9, 10]
YSi ≤1840	oC8	CrB	4.251	1.0526	0.3826	[9, 10]
YSi _{2-x} <1635	hP3	AlB ₂	3.843	–	4.143	[10]

Состав, температурная область, °С	Символ Пирсона / Пространств. группа	Прототип	Параметры элементарной ячейки, нм			Литература
			a	b	c	
Y-Si						
βYSi_2 1520–1250	tI12	ThSi ₂	4.04	–	1.342	[10]
αYSi_2 <1250	oI12	GdSi ₂	4.052	3.954	1.3360	[10]
Al-Si-Y						
$\tau_1, \text{Y}_5\text{Al}_{14}\text{Si}$	hP8	Ni ₃ Sn	0.6247	–	0.4590	[11]
$\tau_2, \text{Y}_6\text{Al}_3\text{Si}$	tI80	Tb ₆ Al ₃ Si	1.163	–	1.512	[8]
$\tau_3, \text{Y}_{33.3}\text{Al}_{46.7}\text{Si}_{20}$	oI12	YAl _{31.4} Si _{0.6}	0.4072	0.5812	0.8823	[10-12]
$\tau_4, \text{YAl}_2\text{Si}$	mC16	YAl ₂ Si	1.042	0.4070	0.6741	[11, 12]
			$\beta = 101^\circ$			
$\tau_5, \text{Y}_{33.3}\text{Al}_{36.7}\text{Si}_{30}$	–	–	–	–	–	[11]
$\tau_6, \text{YAl}_2\text{Si}_2$	hP5	La ₂ SO ₂	0.4181	–	0.6559	[11]

На рис. 1 представлены изотермические сечения тройной системы Al–Si–Y при разных температурах [8, 11, 13, 14]. В этой тройной системе установлено шесть трехкомпонентных соединений (τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_4 , τ_5 , τ_6). Параметры кристаллических структур трехкомпонентных соединений приведены в табл. 1.

На рис. 2 приведено политермическое сечение YAl₂–Si в тройной системе Al–Si–Y, полученное на основе экспериментальных данных [15] и термодинамических расчетов [16]. Это политермическое сечение является квазибинарным эвтектическим. Сечение YAl₂–Si включает два трехкомпонентных соединения τ_4 и τ_6 , образованных в результате перитектических реакций (рис. 1, рис. 2).

Специфической особенностью тройной системы Al–Si–Y является отсутствие однофазных областей с твердыми растворами и наличие трехкомпонентных интерметаллических соединений с определенными стехиометрическими соотношениями внутри изотермического треугольника (рис. 1, табл. 1). Образование шести трехкомпонентных соединений τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_4 , τ_5 , τ_6 происходит в результате перитектических реакций. Это приводит к существованию широкого спектра двухфазных и трехфазных областей внутри изотермического треугольника.

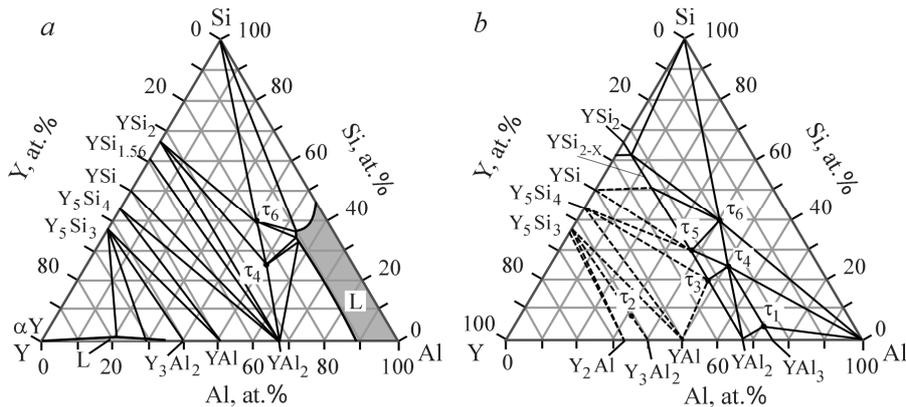


Рис.1. Изотермические сечения тройной системы Al-Si-Y при разных температурах: $T = 1025^\circ\text{C}$ (a) и $T = 500^\circ\text{C}$ (b) [8, 11, 13, 14].

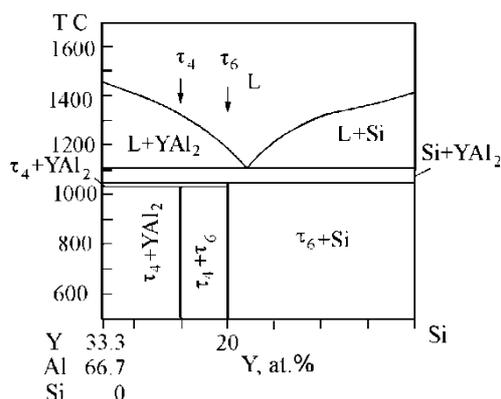


Рис.2. Политермическое сечение YAl_2 -Si в системе Al-Si-Y [15, 16]

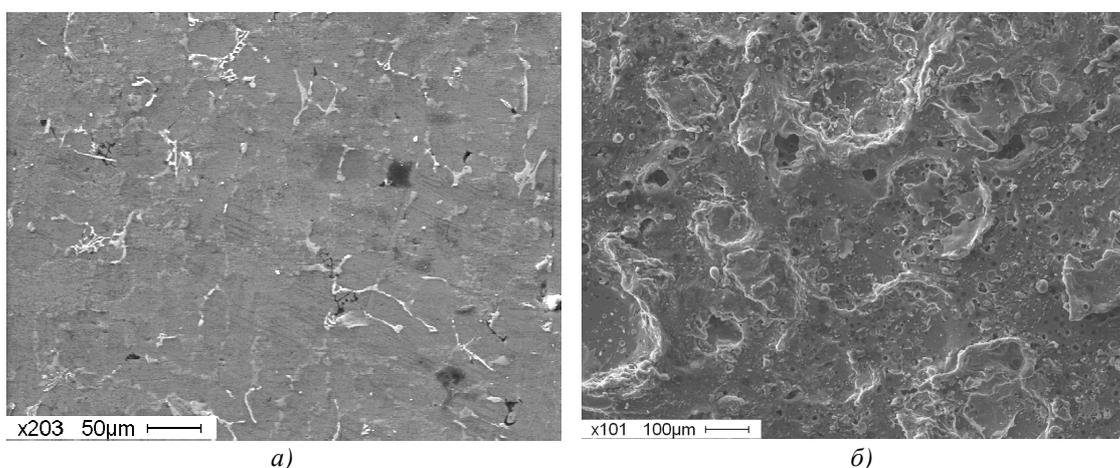


Рис.3. Структура силумина в исходном состоянии (а) и после электровзрывного легирования (б).

Электровзрывное легирование (ЭВЛ), как правило, приводит к существенному увеличению прочностных (микротвердость) и трибологических (износостойкость) свойств модифицированного материала. К примеру, выполненная в настоящей работе обработка силумина привела к увеличению износостойкости модифицированного слоя более чем в 200 раз. Однако, не смотря на очевидные достоинства данного метода, ЭВЛ сопровождается формированием высокорельефной, высокопористой поверхности модифицируемого материала, что существенно затрудняет использование данного метода в качестве финишной обработки деталей и механизмов (рис. 3). Продолжением настоящей работы будет являться поиск оптимальных режимов облучения модифицированной ЭВЛ поверхности силумина интенсивным импульсным электронным пучком.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №16-58-00075-Бел_а). Авторы выражают благодарность профессору В.Е. Громову, предоставившему образцы силумина, подвергнутые ЭВЛ, и Е.А. Петриковой, осуществившей трибологические испытания модифицированного силумина.

Литература.

1. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки металлов. – М.: Круглый год, 2001. – 528с.
2. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Под ред. Н.Н. Коваля, Ю.Ф. Иванова. – Томск: НТЛ, 2016. – 298 с.
3. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / Под ред. Н.Н. Коваля, Ю.Ф. Иванова. – Томск: НТЛ, 2016. – 312 с.
4. Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – 301с.

5. Структура, фазовый состав и свойства поверхностных слоев титановых сплавов после электро-взрывного легирования и электронно-пучковой обработки / Под ред. В.Е. Громова, Ю.Ф. Иванова, Е.А. Будовских. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2012. – 435 с.
6. Будовских Е.А., Сарычев В.Д., Громов В.Е., Носарев П.С., Мартусевич Е.В. Основы технологии обработки поверхности материалов импульсной гетерогенной плазмой. – Новокузнецк: СибГИУ, 2002. – 170с.
7. Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. – М.: Машиностроение. – 1996-2000. – Т.1-3.
8. Gesc K.A., Gschneidner, Jr., Calderwood F.W. The Al-RE (Aluminum-Rare Earth) Systems, Bull. Alloy Phase Diagrams, 9, 658-668 (1988).
9. Massalski T.B. Binary Alloy Phase Diagrams. American Society for Metals, Metals Park. Ohio. 1986. 1987. V. 1, 2. 2224 p.
10. Villars P., Calvert L.D. Pearson's Handbook of Crystallographic Data for Intermetallic Phases. Ohio: Metals Park, 1985. V. 1, 2, 3. 3258 p.
11. Muraveva A.A. Phase Equilibria and Crystal Structures in Ternary Systems Aluminum-Silicon (Germanium)-Rare Earth, Avtoref. Dis. Kand. Khim., Abstract of Thesis, Nauk Lvov, 1-22.
12. Yanson T.I., Investigation of the Crystal Structures of the Aluminium-Silicides and -Germanides of the Rare Earth Metals (in Russian), Avtoref. Dis. Kand. Khim., Abstract of Thesis, Nauk, Lvov, 1-22.
13. Muraveva A.A., Zarechnyuk O.S. and Gladyshevski E.I., Compounds with the La_2O_2S -Type in the Systems: Rare Earth Metal-Aluminium-Silicon (in Russian), Visn. Lvivsk. Univ. Ser. Khim., 13, 14-16 (1972).
14. Dubenko I.S., Evdokimov A.A. and Titov Yu.N. Ln_6Al_3Si Compounds. J. Inorg. Chem., 30, 1707-1709 (1985), translated from Zh. Neorg. Khim., 30, 2996-2997 (1985).
15. Drits M.E., Kuzmina V.I., Tylkina N.I., Phase Equilibria in Aluminium-Rich Alloys of the Aluminium-Silicon-Yttrium System. Russ. Metall., (3), 178-181 (1980).
16. Ran Q., Thermodynamic Calculations of Constitution Diagrams in the System Mg-Y-Al-C-Si-N-O. Thesis, Univ. Stuttgart, FRG, 1-217 (1987).