

КОМПЛЕКСНАЯ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ДОЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА: СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТИ

В.Е. Громов^{1†}, Д.В. Загуляев¹, Ю.А. Рубанникова¹, Е.А. Петрикова^{2,3}

[†]gromov@physics.sibsiu.ru

¹Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, 654007, Новокузнецк, Россия

²Институт сильноточной электроники СО РАН, пр. Академический, 2/3, 634055, Томск, Россия

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, 634050, Томск, Россия

Методами современного физического материаловедения проведен послойный анализ структурно фазовых состояний и трибологических свойств доэвтектического силумина марки АК10М2Н на глубине до 170 мкм после комплексной обработки. Она заключалась в электровзрывном легировании титаном и порошком оксида иттрия с последующей электронно-пучковой обработкой. В работе реализована следующая комбинированная обработка поверхности: массы взрываемых фольг титана и порошка Y_2O_3 составляли по 58,9 и 88,3 мг, при плотности энергии $E_s = 35$ Дж/см² и напряжении разряда $U = 2,6$ кВ. Установлено, что электровзрывная обработка сопровождается как легированием поверхностного слоя элементами плазмы, так и внедрением в поверхностный слой частиц исходного порошка оксида иттрия. Комплексная поверхностная обработка приводит к растворению включений Si и интерметаллидов, характерных для литого состояния. Она формирует многоэлементный многофазный слой толщиной до ≈ 170 мкм, размеры кристаллитов которого изменяются в пределах от единиц до сотен нанометров. Наряду с атомами исходного материала (Al, Si, Cu, Ni, Fe) поверхностный слой обогащен атомами титана, иттрия, кислорода. Методом картирования выявлено неоднородное распределение легирующих элементов в модифицированном слое. Установлено, что модифицированный слой имеет структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации и содержит включения ограниченной формы, относительное содержание которых снижается по мере удаления от поверхности. Ячейки высокоскоростной кристаллизации обогащены преимущественно атомами алюминия; прослойки, разделяющие ячейки, обогащены, преимущественно атомами кремния. Выявлено, что прослойки кремния, располагающиеся вдоль границ и в стыках границ ячеек кристаллизации, сформированных твердым раствором на основе алюминия, имеют нанокристаллическую структуру. Комплексная поверхностная обработка увеличивает износостойкость в (20) раз по отношению к исходному силумину и в (2,8) раза по отношению к силумину после ЭВЛ. Коэффициент трения снижается в $\approx 1,5$ раза по отношению к исходному силумину.

Ключевые слова: доэвтектический силумин, электровзрывное легирование, титан, оксид иттрия, электронно-пучковая обработка, структура, фазовый состав, износостойкость.

COMPLEX ELECTRON-ION-PLASMA PROCESSING OF HYPOEUTECTIC SILUMIN: STRUCTURE AND PROPERTIES OF SURFACE

V.E. Gromov^{1†}, D.V. Zagulyaev¹, Yu.A. Rubannikova¹, E.A. Petrikova^{2,3}

[†]gromov@physics.sibsiu.ru

¹Siberian State Industrial University, Kirov Str., 42, Novokuznetsk, 654007, Russia

²Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademicheskii Pr., 2/3, Tomsk, 634055, Russia

³National Research Tomsk Polytechnic University, Lenin Pr., 30, Tomsk, 634050, Russia

The layer-by-layer analysis of structural phase states and tribological properties of hypoeutectic silumin of AK10M2N grade at the depth up to 170 μ m after the complex processing was carried out by the methods of modern physical material science. It involved the electroexplosion alloying by titanium and yttrium oxide powder followed by electron beam processing. The combined surface processing are realized in the research: the masses of titanium foil and Y_2O_3 powder being exploded amounted to 58.9 and 88.3 mg at energy density of electron beam $E_s = 35$ J/cm² and discharge voltage of $U = 2.6$ kV. It has been stated that electroexplosion processing is accompanied both by the alloying of the surface layer by plasma elements and the penetration of the initial powder particles of yttrium oxide. The complex surface processing leads to the dissolution of Si inclusions and intermetallics typical of the cast state. It forms the multielemental multiphase layer up to ≈ 170 μ m thick the crystallites' sizes of which vary within the limits from units to hundreds of nanometers. Along with the atoms of the initial material (Al, Si, Cu, Ni, Fe) the surface layer is enriched by the atoms of titanium, yttrium, oxygen. The inhomogeneous distribution of the alloying elements in the modified layer was determined by the method of mapping. It has been found that the modified layer has the structure of high-velocity cellular crystallization and contains the inclusions of the faceted form whose relative content decreases when moving away from the surface. The cells of high-velocity crystallization are mainly enriched by aluminum atoms; the interlayers separating the cells are chiefly enriched by silicon atoms. It has been detected that silicon interlayers being located along the boundaries and in the junctions of cell crystallization boundaries formed by the solid solution based on aluminum have a nanocrystalline structure. The complex surface processing increases 20 – fold in wear resistance with respect to the initial silumin and 2.8 – fold in reference to silumin after electroexplosion alloying. The friction factor increases ≈ 1.5 – fold relative to the initial silumin.

Keywords: hypoeutectic silumin, electroexplosion alloying, titanium, oxide yttrium, electron beam processing, structure, phase composition, wear resistance.

Введение

Модификация поверхностных свойств легких металлов и сплавов – не только широко исследованное, но все еще достаточно перспективное направление. Эффективность работы поверхностно упрочненного изделия определяется многими факторами, основными из которых являются: прочность и твердость упрочненной зоны, однородность структуры и свойств, высокое сопротивление разрушению, в основном зарождению трещин. Среди многообразия методов модифицирования поверхности (лазерная, плазменная, ультразвуковая обработка, ионные пучки и др.) особое место занимают электровзрывное легирование (ЭВЛ) [1] и электронно-пучковая обработка (ЭПО) [2, 3]. ЭВЛ позволяет осуществлять легирование как простыми металлами, так и сложными соединениями – карбидами, оксидами, боридами и т.д., обеспечивая высокий уровень эксплуатационных свойств поверхности [4-9].

ЭПО обладает большими возможностями контроля количества подводимой энергии, создания большой площади воздействия концентрированного потока энергии на обрабатываемый материал, малыми коэффициентами отражения энергии, высокой концентрацией энергии в единице объема материала. ЭПО обеспечивает сверхвысокие скорости нагрева (до 10^6 К/с) поверхностного слоя до заданных температур, формирование предельных по величине градиентов температуры (до 10^7 - 10^8 К/м) и охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростями 10^4 - 10^9 К/с. В результате в поверхностном слое создаются условия образования неравновесных субмикро- и нанокристаллических и аморфных структурно-фазовых состояний [10, 11].

ЭПО приводит к плавлению поверхностного слоя, растворению включений кремния и интерметаллидов, формированию структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации, повторному выделению частиц второй фазы субмикро-наноразмерного диапазонов. Выявлено кратное изменение механических и трибологических характеристик поверхностного слоя силумина, облученного импульсным электронным пучком [12-16].

ЭВЛ и ЭПО хорошо сочетаются друг с другом, имеют сопоставимые значения времени импульса, диаметра облучаемой поверхности,

интенсивности и глубины зоны воздействия. Вместе с тем электронно-пучковая обработка не оказывает давления на поверхность. Приводя к ее оплавлению, она под действием капиллярных сил выравнивает рельеф. Это не единственная причина, вызывающая интерес к комбинированной обработке, сочетающей ЭВЛ и последующее электронно-пучковое воздействие. Такая обработка приводит к изменению структурно-фазовых состояний и улучшению свойств поверхностных слоев [17-21].

Целью настоящей работы является выявление и анализ закономерностей эволюции элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры доэвтектического силумина марки АК10М2Н, подвергнутого комбинированной обработке, на первом этапе которой осуществлялось электровзрывное легирование поверхности материала, а на втором – облучение легированного слоя интенсивным импульсным электронным пучком.

1. Материал и методики исследования

В качестве материала исследования был использован силумин марки АК10М2Н в литом состоянии (литье в кокиль). Химический состав силумина марки АК10М2Н приведен в табл.1 [22]. Образцы имели форму пластинок с размерами 20х20х15 мм.

Поверхностное модифицирование образцов силумина осуществляли комбинированным методом, сочетающим электровзрывное легирование (первый этап обработки [1]) и облучение интенсивным импульсным электронным пучком (второй этап обработки [11]). Электровзрывное легирование (ЭВЛ) проводили порошком оксида иттрия, расположенным на фольге титана марки ВТ1-0 (режим электровзрывного легирования): масса титановой фольги, m_{Ti} – 0,0589 г; масса порошка Y_2O_3 , $m_{Y_2O_3}$ – 0,0883 г; напряжение разряда, $U = 2,6$ кВ.

Облучение образцов силумина интенсивным импульсным электронным пучком осуществляли на установке «СОЛО» [23] (параметры пучка электронов: энергия ускоренных электронов $U = 17$ кэВ, плотность энергии пучка электронов $E_s = 35$ Дж/см², длительность импульсов $\tau = 150$ мкс, количество импульсов $n = 3$, частота следования импульсов $f = 0,3$ с⁻¹; давление остаточного газа (аргон) в рабочей камере установки $p = 2 \cdot 10^{-2}$ Па). Параметры об-

лучения были выбраны на основе результатов моделирования температурного поля, формирующегося при ЭПО [24-27].

Исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры проводили методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Philips SEM-515), просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-2100F) [28-30]. Анализировали фольги, изготовленные методами ионного утонения пластинок, вырезанных перпендикулярно поверхности облучения. Такое расположение фольг позволяет провести анализ структуры и элементного состава материала в зависимости от расстояния от поверхности модифицирования. Элементный состав материала изучали методами микрорентгеноспектрального анализа. Трибологические исследования (определение износостойкости и коэффициента трения) осуществляли на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция) при следующих па-

раметрах: шарик из стали ШХ15 диаметром 6 мм, радиус трека – 4 мм, нагрузка на индентор – 12 Н и длина трека – 100 м. Степень износа материала определяли по результатам профилометрии сформировавшегося при испытаниях трека.

2. Результаты исследования и обсуждение

Сплав Al-Si (доэвтектический силумин), являющийся материалом исследования, содержит сравнительно большой набор легирующих и примесных элементов (табл.1). Наличие легирующих и примесных элементов способствует, с одной стороны, повышению прочностных свойств материала, а с другой стороны, приводит к снижению трещиностойкости силумина, что обусловлено формированием кремния и интерметаллидов пластинчатой морфологии [11, 22, 23, 31].

Таблица 1. Химический состав в % силумина марки АК10М2Н по ГОСТ 30620 – 98

Fe	Si	Mn	Ni	Ti	Al	Cu	Pb	Mg	Zn	Sn	Примесей
до 0.6	9.5-10.5	до 0.05	0.8-1.2	до 0.05	84.28-86.1	2-2.5	до 0.05	0.9-1.2	до 0.06	до 0.01	всего 0.7

Примечание: Al – основа; процентное содержание Al дано приблизительно.

Включения вторых фаз имеют разнообразную форму. Размеры включений изменяются в пределах единиц – десятков микрометров. Согласно металлографическим исследованиям, представленным в [31-34], в силуминах методами избирательного травления можно выявить пластинчатые включения светло-серого цвета – фаза $\beta(\text{Al}_5\text{SiFe})$; включения, имеющие форму правильных многогранников коричневого цвета – фаза $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$; при малом количестве железа форма частиц подобна китайским ие-

роглифам; включения серого цвета овальной формы – частицы кремния.

Результаты исследований элементного состава, представленные в табл.2, свидетельствуют о том, что химические элементы сплава распределены в объеме материала весьма неоднородно, формируя соединения, различающиеся размерами, контрастом, морфологией и элементным составом. Любопытно отметить, что в зерне эвтектики Al-Si (область 2 на рис.1) относительное содержание меди и никеля выше, чем в зерне алюминия (область 4 на рис.1).

Таблица 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа участка поверхности образца силумина, электронно-микроскопическое изображение которого представлено на рис.1

Область	Элемент (остальное Al, вес. %)				
	Si	Ni	Cu	Fe	Mn
1	0,6	13,5	13,3	0,0	0,0
2	8,7	0,3	2,2	0,0	0,0
3	1,7	11,8	14,0	0,0	0,0
4	0,5	0,2	1,3	0,0	0,0
5	22,5	1,1	1,6	1,2	0,0
6	1,1	14,8	15,8	0,5	0,0
7	2,3	17,2	5,2	2,7	0,6

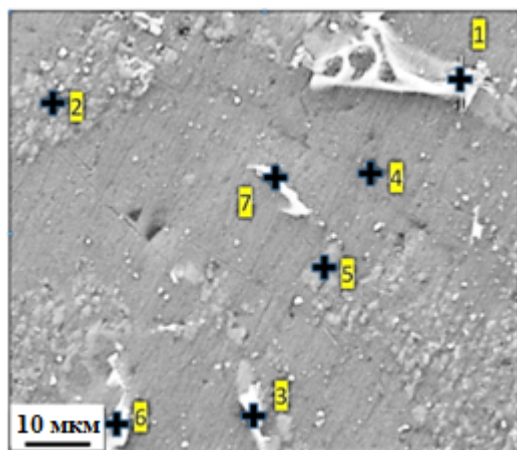


Рис.1. Электронно-микроскопическое изображение структуры силумина; указаны области, в которых был выполнен микрорентгеноспектральный анализ элементного состава материала. Сканирующая электронная микроскопия

Таким образом, выполненные исследования выявили формирование в силумине при литье к кокиль многофазной структуры, содержащей включения кремния и интерметаллидов разнообразной формы, размеры которых достигают единиц – десятков микрометров.

После комплексной обработки методами сканирующей электронной микроскопии выявлена фрагментация поверхностного слоя микротрещинами, на модифицированной поверхности обнаруживаются микропоры, микрократеры, наплывы материала. Микроструктура поверхностного слоя сформирована кристаллитами размерами (0,4-0,7) мкм.

Результаты выполненных исследований методами микрорентгеноспектрального анализа показали, что в поверхностном слое силумина средняя концентрация иттрия составляет 17,9 вес. %, титана – 22,5 вес. %, кислорода – 6,3 вес. %.

Анализируя результаты исследования поперечных шлифов, представленные на рис.2а, можно отметить, что толщина модифицированного слоя изменяется в пределах от 45 мкм до 80 мкм. Модифицированный слой имеет субмикро- нанокристаллическую структуру и свободен от включений кремния и интерметаллидов, присутствующих в литом силумине (рис.2б).

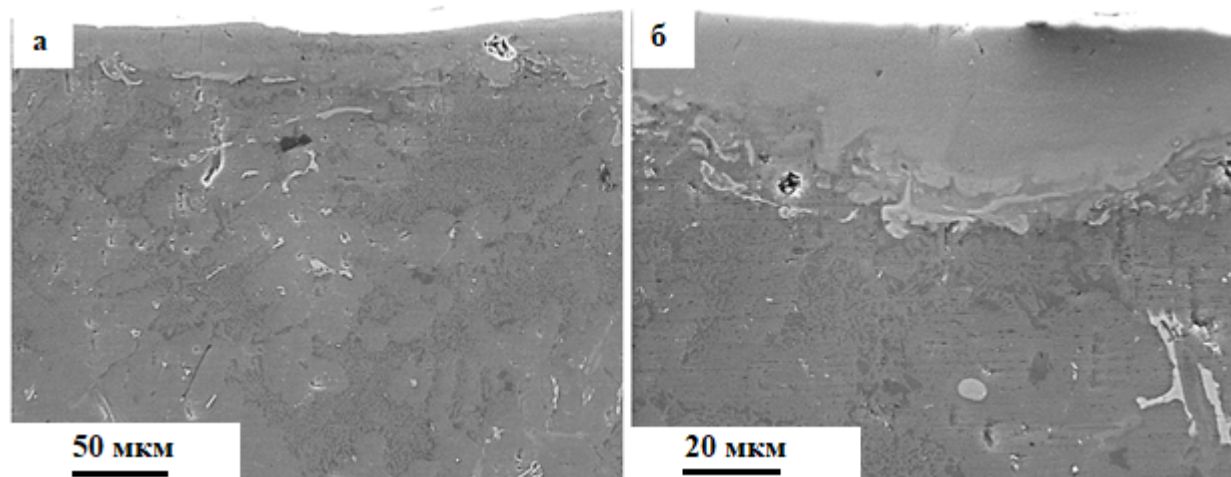


Рис.2. Характерное электронно-микроскопическое изображение структуры поперечного шлифа силумина, подвергнутого комбинированной обработке

Методами микрорентгеноспектрального анализа проведены исследования распределения атомов иттрия по толщине модифицированного слоя. Результаты, представленные на рис.3, показывают, что фиксируется два максимума распределения атомов иттрия в объеме модифицированного слоя. Часто второй максимум соответствует границе раздела «модифицированный слой / основной объем силумина».

Концентрация иттрия зависит от анализируемого участка материала. Анализ концентрационных профилей, представленных на рис.3, свидетельствует о том, что неоднородность распределения атомов иттрия выявляется как в поперечном, так и в продольном сечении материала, т.е. носит объемный характер.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава фольги силумина,

модифицированного комплексным методом, приведены на рис.4. Отчетливо видно, что толщина слоя, в котором обнаруживается присутствие легирующих элементов (титан, иттрий, кислород), не превышает 170 мкм. Основными элементами данного слоя являются алюминий и титан. Концентрация остальных элементов изменяется в пределах от 1 вес. % до 5 вес. %. При увеличении расстояния от поверхности модифицирования относительное содержание титана и иттрия снижается, концентрация атомов алюминия и кремния увеличивается, достигая значений, характерных для химического состава силумина, концентрация остальных легирующих элементов сплава изменяется незначительно.

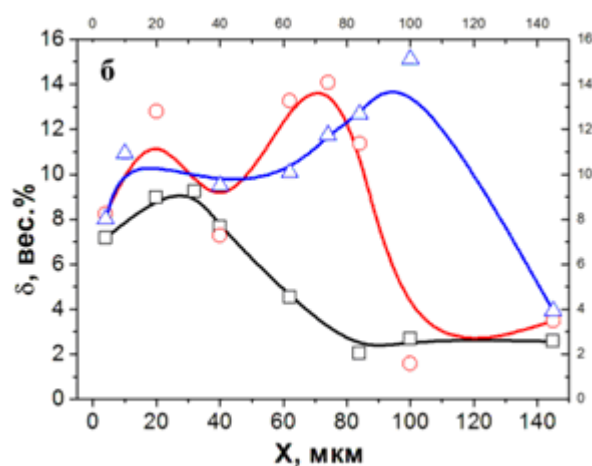


Рис.3. Распределение относительного содержания атомов иттрия по толщине модифицированного слоя силумина. Результаты получены для трех дорожек элементного анализа

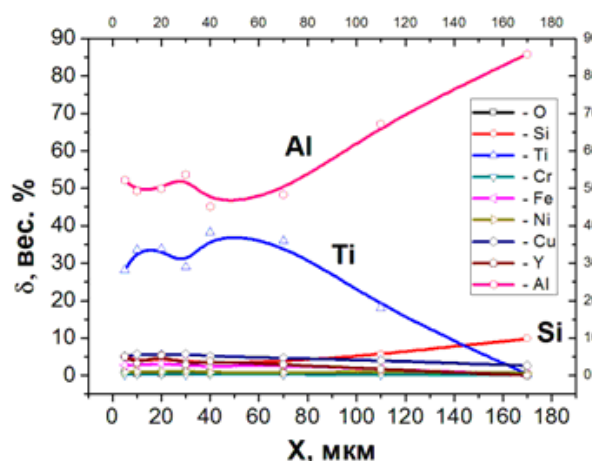


Рис.4. Зависимость относительного содержания химических элементов от расстояния от поверхности модифицирования силумина марки АК10М2Н

Визуализировать распределение химических элементов модифицированного слоя образца силумина позволяет микрорентгеноспектральный анализ, а именно, метод картирования [35]. На рис.5 приведены результаты исследования распределения атомов титана, кремния и иттрия в слое толщиной ≈ 10 мкм, примыкающем к поверхности комплексной обработки. Видно, что атомы данных элементов распределены в поверхностном слое неоднородно, формируя включения различной формы и размеров. Следует отметить, что структура подобного типа наблюдается в слое толщиной до 40 мкм.

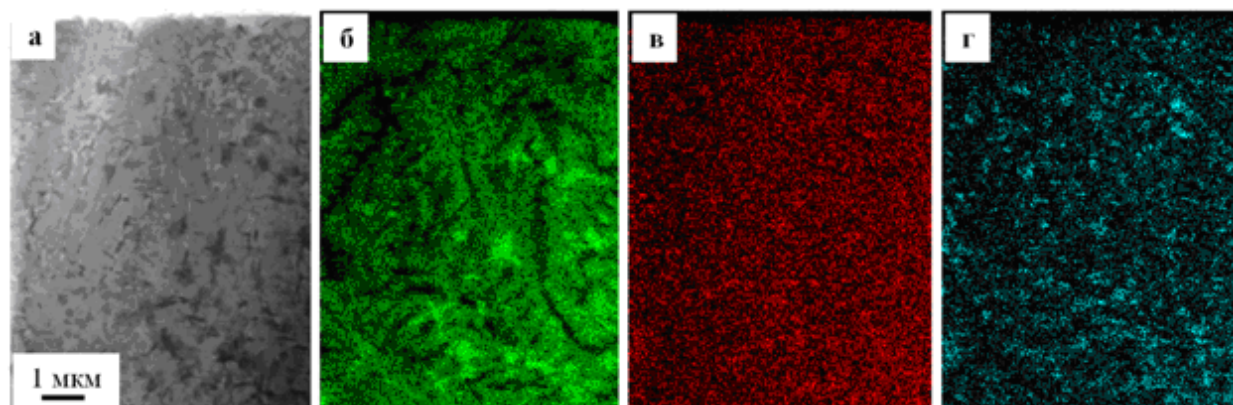


Рис.5. Электронно-микроскопическое (светлое поле) изображение структуры модифицированного слоя силумина, примыкающего к поверхности обработки (а, верхняя часть снимка соответствует поверхности модифицирования); б-г – изображения данного участка фольги, полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов титана (б), кремния (в) и иттрия (г)

Результаты количественного анализа элементного состава участка фольги, приведенного на рис.5а, представлены в табл.3.

На расстоянии (40-50) мкм от поверхности комплексной обработки обнаруживается слой материала, содержащий частицы сферической формы, обогащенные атомами иттрия и кисло-

рода. Форма частиц и их элементный состав позволяют предположить, что данные частицы являются частицами исходного порошка оксида иттрия, не разрушившимися при электровзрывном легировании. Размеры частиц изменяются в пределах от 50 нм до 1,2 мкм.

Таблица 3. Результаты микрорентгеноспектрального анализа участка фольги, представленного на рис.5а

Элемент	Содержание		Ошибка измерения, %
	вес. %	ат. %	
O	0,83	1,76	0,21
Al	52,18	65,51	0,0
Si	4,87	5,87	0,04
Ti	28,13	19,89	0,01
Cr	0,26	0,17	1,07
Fe	2,76	1,67	0,11
Ni	0,94	0,54	0,39
Cu	5,04	2,68	0,09
Y	4,99	1,9	0,19

На рис.6 приведены результаты микрофракционного электронно-микроскопического анализа поверхностного слоя силумина (поверхность модифицирования указана стрелкой на рис.6а). Видно, что размеры кристаллитов, формирующих исследуемый слой материала, изменяются в пределах от единиц до сотен нанометров, т.е. модифицируемый слой является субмикро- нанокристаллическим материалом. Микрорентгеноспектральный анализ поверхностного слоя модифицированного материала показал, что основными химическими элементами данного слоя являются алюминий и титана, в существенно меньшем количестве присутствуют кремний, медь и иттрий (рис.5, табл.3). Результаты темнопольного анализа фазового состава данного слоя приведены на рис.6в-е. Анализ микроэлектроннограмм показывает, что кристаллиты субмикронных размеров сформированы твердым раствором на основе алюминия (рис.6д). Включения наноразмерного диапазона сформированы частицами алюминидов титана и иттрия состава Al_3Ti и Y_3Al_2 , а также силицидами титана состава $TiSi_2$.

На данном расстоянии 70 мкм от поверхности модифицирования структура силумина представлена ячейками высокоскоростной кристаллизации. Размеры ячеек изменяются в пределах (0,5-0,6) мкм. Анализ микроэлектроннограмм показывает, что ячейки кристаллизации

сформированы твердым раствором на основе алюминия. Ячейки разделены прослойками второй фазы, поперечные размеры которых изменяются в пределах (50-70) нм. Микрофракционный анализ с привлечением методики темнопольного изображения показывает, что по границам ячеек кристаллизации располагаются частицы кремния и частицы соединения $Cu_{2,7}Fe_{6,3}Si$.

Выявленные преобразования поверхностного слоя силумина должны оказывать существенное влияние на трибологические свойства материала. Выполненные испытания показали, что комплексная поверхностная обработка силумина приводит к многократному увеличению износостойкости модифицированного слоя и снижению коэффициента трения, что обусловлено формированием многофазного субмикронанокристаллического состояния.

По отношению к исходному силумину выявлено повышение износостойкости в (20) раз; по отношению к силумину, облученному интенсивным импульсным электронным пучком, повышение износостойкости составило (2,8) раза. Коэффициент трения снижается при комбинированной обработке по отношению к исходному силумину в $\approx 1,5$ раза и по отношению к силумину, облученному интенсивным импульсным электронным пучком, в $\approx 1,3$ раза.

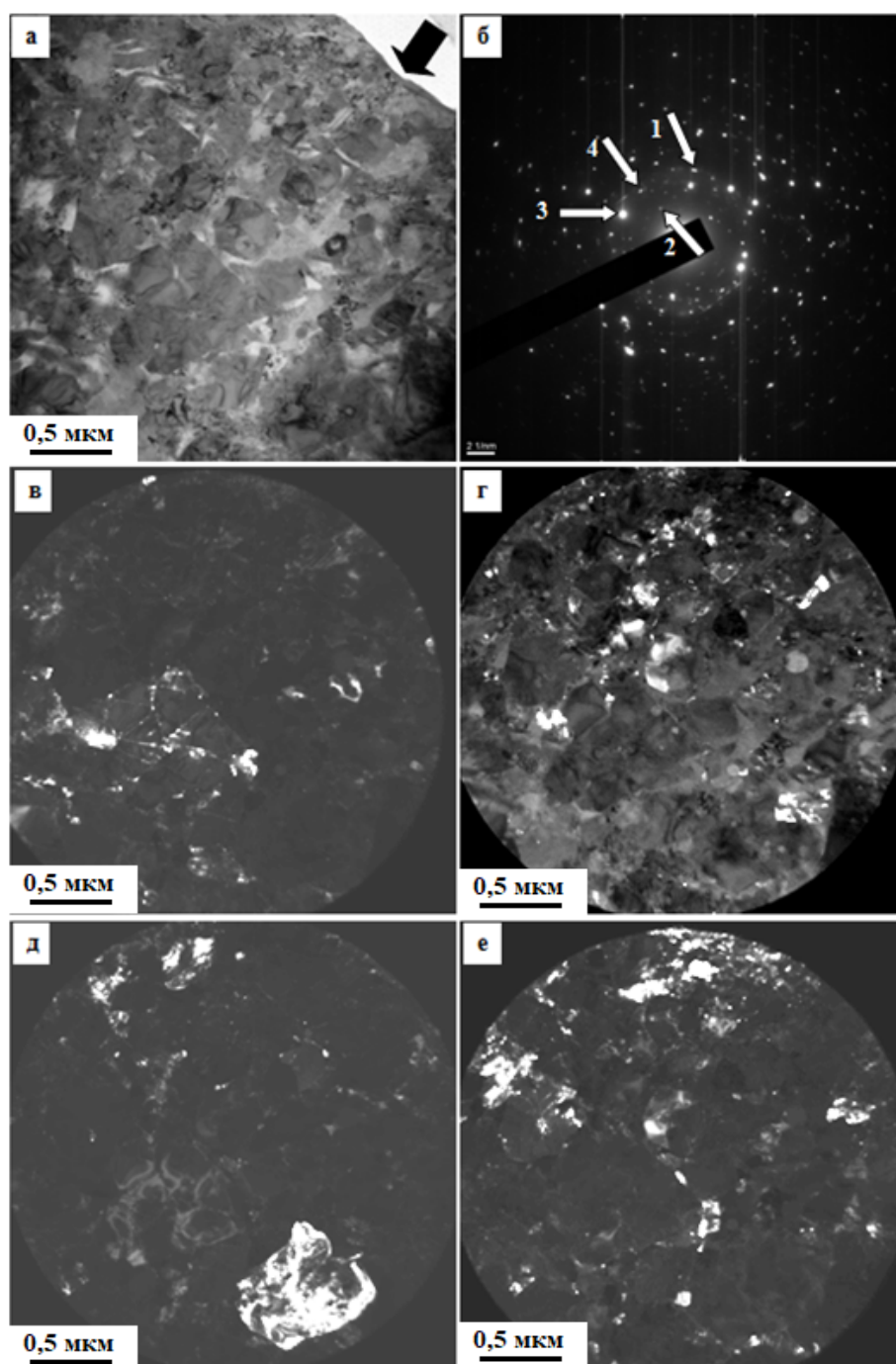


Рис.6. Электронно-микроскопическое изображение структуры слоя, примыкающего к поверхности модифицирования силумина; а – светлое поле; б – микроэлектронограмма; в-е – темные поля, полученные в рефлексах $[004]\text{TiSi}_2$, $[002]\text{Y}_3\text{Al}_2$, $[111]\text{Al}$, $[118]\text{Al}_3\text{Ti}$, соответственно; стрелками указано: на (а) – поверхность модифицирования, на (б) – рефлексы, в которых получены темные поля (1) – в, (2) – г, (3) – д, 4 – е

Закключение

Осуществлена комплексная обработка поверхности доэвтектического силумина, сочетающая электровзрывное легирование титаном и оксидом иттрия и последующее облучение

интенсивным импульсным электронным пучком. Исследования, выполненные методами современного физического материаловедения, выявили формирование протяженного поверхностного слоя, концентрация титана и иттрия в котором зависит от расстояния до поверхности

модифицирования. Методом картирования выявлено неоднородное распределение атомов легирующих элементов в модифицированном слое. Установлено, что электровзрывная обработка сопровождается как легированием поверхностного слоя элементами плазмы, так и внедрением в поверхностный слой частиц исходного порошка оксида иттрия. Установлено, что комплексная обработка приводит к формированию в поверхностном слое силумина многофазного субмикронаноразмерного состояния, размеры кристаллитов которого изменяются в пределах от единиц до сотен нанометров. По отношению к исходному силумину выявлено повышение износостойкости в (20) раз; по отношению к силумину, облученному интенсивным импульсным электронным пучком, повышение износостойкости составило (2,8) раза. Коэффициент трения снижается по отношению к исходному силумину в $\approx 1,5$ раза и по отношению к силумину, облученному интенсивным импульсным электронным пучком, в $\approx 1,3$ раза.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке государственного задания Минобрнауки РФ (проект №3.1283.2017/4.6) и грантов РФФИ (проекты № 19-52-04009 и №19-48-700010).

Список используемой литературы

- Багаутдинов А.Я., Будовских Е.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2007. – 301 с.
- Gromov V. E., Ivanov Yu. F., Vorobiev S. E., Kononov S.V. Fatigue of steels modified by high intensity electron beams. – Cambridge, 2015. – 272 p.
- Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Чэнь С. Формирование структуры и свойств силумина при электронно-пучковой обработке // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2018. – Т.15, №4. – С. 506–512.
- Zagulyaev D.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A., Teresov A.D., Kononov S.V., Semin A.P. Study of the surface relief, structure and phase composition of the silumin composite layer obtained by the method of electron explosion alloying by Al-Y₂O₃ system // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2018. – P. 1115.
- Шляров В.В., Осинцев К.А., Бутакова К.А., Загуляев Д.В., Романов Д.А. Получение покрытий системы AL-Y₂O₃ методом электровзрывного легирования // Перспективные материалы и технологии: Материалы международного симпозиума. В 2-х частях. Под редакцией В.В. Рубаника. – Витебск. 2017. – С. 91–93.
- Kononov S., Gromov V., Ivanov Yu. Multi-layer structure of Al-Si alloy after electro-explosion alloying with yttrium oxide powder // Material Research Express. – 2018. – 5. – P. 116520.
- Kononov S.V., Zagulyaev D.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Effect of yttrium oxide modification of Al-Si alloy on microhardness and microstructure of surface layers // Metabk. – 2018. – V.57(4). – P. 253–256.
- Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Zagulyaev D.V., Tolkachev O.S., Petrikova E.A., Kononov S.V. A study on changes in the properties of silumin surface layers modified by yttrium oxide // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V.411. – P. 012023.
- Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kononov S.V., Zagulyaev D.V., Petrikova E.A., Semin A.P. Modification of structure and surface properties of hypoeutectic silumin by intense pulse electron beams // Usp. Fiz. Met. – 2018. – V.19, No.2. – P. 195–222.
- Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам. – Томск: Изд-во научно-технической литературы, 2016. – 303 с.
- Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 312 с.
- Ivanov Yu. F., Gromov V. E., Kononov S. V., Zagulyaev D. V., Petrikova E. A. Structural-Phase State and the Properties of Silumin after Electron-Beam Surface Treatment // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – V.4. – P. 398–402.
- Zagulyaev D., Kononov S., Gromov V., Melnikov A., Shlyarov V. Research into morphology and phase structure in the surface of Al-Si alloy modified by yttrium oxide // Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences. – 2019. – V.67. – Is.1. – P. 1–5.
- Zagulyaev D. V., Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu. F. Increase in wear resistance of the surface layers of AK10M2N silumin at electron-beam treatment // Inorganic Materials: Applied Research. – 2019. – V.10. – Is.3. – P. 622–628.
- Gromov V., Kononov S., Ivanov Y., Zagulyaev D., Petrikova E., Serenkov Y. Evolution of structure-phase states of hypoeutectic silumin irradiated by intensive pulse electron beams // Materials Research Express. – 2019. – V.6. – Is.7. – P. 076574.

16. Konovalov S., Gromov V., Zagulyaev D., Ivanov Y., Semin A., Rubannikova J. Dispersion of Al-Si Alloy Structure by Intensive Pulsed Electron Beam // Archives of foundry engineering. – 2019. – V.19. – Is.2. – P. 79–84.
17. Иванов Ю.Ф., Карпий С.В., Морозов М.М., Коваль Н.Н., Будовских Е.А., Громов В.Е. Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки. – Новокузнецк: Изд-во НПК, 2010. – 173 с.
18. Формирование структурно-фазовых состояний металлов и сплавов при электровзрывном легировании и электронно-пучковой обработке / под ред. В. Е. Громова. – Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2011. – 212с.
19. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Будовских Е.А. и др. Структура, фазовый состав и свойства поверхностных слоев титановых сплавов после электровзрывного легирования и электронно-пучковой обработки. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2012. – 430 с.
20. Райков С.В., Будовских Е.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Ващук Е.С. Формирование структурно-фазовых состояний и свойств поверхности титановых сплавов при электровзрывном легировании и последующей электронно-пучковой обработке. – Новокузнецк: Интер-Куз-басс, 2014. – 267 с.
21. Соснин К.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования иттрием и электронно-пучковой обработки. – Новокузнецк: Полиграфист, 2015. – 233 с.
22. Сплавы алюминиевые для производства поршней. Технические условия. ГОСТ 30620 - 98. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2000 г.
23. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // Известия ВУЗов. Физика. – 2008. – №5. – С. 60–70.
24. Денисова Ю. А., Иванов Ю. Ф., Иванова О. В. и др. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки. – Томск: Издательство научно-технической литературы, 2016. – 303 с.
25. Ахмадеев Ю. Х., Денисов В. В., Иванов Ю. Ф. и др. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов. – Томск: Издательство НЛТ, 2016. – 308 с.
26. Ivanov Yu.F., Koval NN, Vlasov V.I., Teresov A.D., Petrikova E.A., Shugurov V.V., Ivanova O.V., Ikonnikova I.A., Klopotov A. A. The structure of the surface alloy resulting from the high-speed melting of the film (TiCu) / substrate (Al) sy // High-temperature material processes. – 2013. – No.17(4). – P. 241–256.
27. Ivanov Yu. F., Krysin O.V., Rygina M., Petrikova E.A., Teresov A.D., Shugurov V.V., Ivanova O.V., Ikonnikova I.A. Combined modification of aluminum by electron-ion-plasma methods // High Temp Mat Proc. – 2014. – No.18. – P. 311–317.
28. Kumar C.S.S.R. (Ed.) Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanomaterials. – New York: Springer, 2014. – 717 p.
29. Barry Carter C., David B. Transmission Electron Microscopy. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.
30. Egerton R.F. Physical Principles of Electron Microscopy. – Berlin: Springer, 2016. – 196 p.
31. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – Москва: Металлургия, 1979. – 640 с.
32. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. – Москва: МИСиС, 2010. – 511 с.
33. Makhloufe M.M., Guthy H.V. The aluminum-silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography // Journal of Light Metals. – 2001. – 1(4). – P. 199–218.
34. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А. и др. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой. – Минск: Беларус. Наука, 2013. – 287 с.
35. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.

Поступила в редакцию 23.08.19.

Сведения об авторах

Громов Виктор Евгеньевич, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой СибГИУ, gromov@physics.sibsib.ru
Загуляев Дмитрий Валерьевич, к.т.н., доцент СибГИУ, zagulyaev_dv@physics.sibsib.ru
Рубаникова Юлия Андреевна, магистрант СибГИУ, rubannikova96@mail.ru
Петрикова Елизавета Алексеевна, с.н.с. ИСЭ СО РАН, elizmarkova@yahoo.com