

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

№ 12 (810). ДЕКАБРЬ. 2022

ОСНОВАН В ИЮЛЕ 1955 г.
ВЫХОДИТ 12 РАЗ В ГОД

Главный редактор: В. С. Крапошин
Зам. гл. редактора: С. Ю. Кондратьев
Зав. редакцией: Н. В. Хабарова

Editor-in-Chief: V. S. Kraposhin
Deputy Editor-in-Chief: S. Yu. Kondrat'ev
Staff Editor: N. V. Khabarova

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

С. К. Гордеев, В. И. Горынин, В. В. Захаров,
В. Н. Зикеев, Yin Fuxing, L. Kaczmarek,
С. Ю. Кондратьев, В. С. Крапошин, Л. И. Куksenova,
М. Л. Лобанов, К. В. Макаренко, V. Yu. Novikov,
А. А. Попов, М. Ю. Семенов, Ю. Н. Симонов,
Ю. А. Соколов, А. S. Chaus

EDITORIAL BOARD

S. K. Gordeev, V. I. Gorynin, V. V. Zakharov,
V. N. Zikeev, Yin Fuxing, L. Kaczmarek,
S. Yu. Kondrat'ev, V. S. Kraposhin, L. I. Kuksenova,
M. L. Lobanov, K. V. Makarenko, V. Yu. Novikov,
A. A. Popov, M. Yu. Semenov, Yu. N. Simonov,
Yu. A. Sokolov, A. S. Chaus

УЧРЕДИТЕЛИ: Издательский дом «Фолиум», редакция

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82955 от 14.03.2022 г.

Полная переводная версия журнала «Metal Science and Heat Treatment» (издательство Springer) включена в международные системы цитирования: Cambridge Scientific Abstracts, Chemical Abstracts Service (CAS), ChemWeb, Current Contents/Engineering, Computing and Technology, Inspec, Mathematical Science Citation Index, Science Citation Index, Science Citation Index Expanded (Sci-Search), SCOPUS. Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней.

FOUNDERS: Folium Publishing Company, Editorial Office

SUBSCRIPTION INDEX
27847 («Pressa Rossii»)

ADDRESS

Bd. 6, 157, Dmitrovskoe sh., Moscow, 127411, Russia
Folium Publishing Company, MiTOM
Tel./Fax: +7 499 258 08 28; 8 916 062 37 72
E-mail: mitom@folium.ru <http://www.mitom.folium.ru>

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС

27847 («Пресса России»)

АДРЕС РЕДАКЦИИ

Россия, 127411, Москва, Дмитровское ш., 157, стр. 6
Издательский дом «Фолиум», MiTOM
Тел./Факс: +7 499 258 08 28; 8 916 062 37 72
E-mail: mitom@folium.ru <http://www.mitom.folium.ru>

PUBLISHER ADDRESS

Bd. 6, 157, Dmitrovskoe sh., Moscow, 127411, Russia
Folium Publishing Company
Tel./Fax: (499) 258 08 28
E-mail: info@folium.ru
<http://www.folium.ru>

АДРЕС ИЗДАТЕЛЯ

Россия, 127411, Москва, Дмитровское ш., 157, стр. 6
Издательский дом «Фолиум»
Тел./Факс: +7 499 258 08 28
E-mail: info@folium.ru
<http://www.folium.ru>



СОДЕРЖАНИЕ

ТЕРМИЧЕСКАЯ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Афанасьев В. К., Попова М. В. Применение термоциклической деформации для повышения эксплуатационных свойств низкоуглеродистой стали 3
- Пустовойт В. Н., Долгачев Ю. В. Структурное состояние мартенсита и остаточного аустенита в углеродистых сталях после закалки в магнитном поле 10

ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ПОКРЫТИЯ

- Полевой Е. В., Козырев Н. А., Михно А. Р., Усольцев А. А., Комаров А. А. Анализ параметров микроструктуры наплавленного слоя порошковой проволокой системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V 15
- Романов Д. А., Почетуха В. В., Московский С. В., Соснин К. В., Иванов Ю. Ф., Громов В. Е. Анализ структуры и свойств Cd – Ag – N-покрытия, сформированного на меди методом электронно-ионно-плазменного напыления 19
- Шляров В. В., Комаров А. А., Козырев Н. А., Полевой Е. В., Михно А. Р. Микроструктура и трибологические свойства наплавленного слоя металла, полученного дуговой наплавкой порошковой проволокой, содержащей порошок титана 27

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

- Шлярова Ю. А., Загуляев Д. В., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., Шляров В. В., Прудников А. Н. Влияние двухэтапного поверхностного модифицирования на структуру силуминов Al – 11 % Si и Al – 20 % Si 34
- Пучков Ю. А., Май Суан Зунг, Плохих А. И., Бенариев И., Назаркин Р. М., Панчо Рамирес В. А. Влияние криогенной обработки и термоудара на остаточные напряжения, структуру и свойства сплава D16 43

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПОРОШКОВЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Мин П. Г., Сухов Д. И., Вадеев В. Е., Рогалев А. М. Влияние режима термической обработки на структуру и механические свойства коррозионно-стойкого жаропрочного сплава ВЖЛ718, полученного методом селективного лазерного сплавления 52

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МАТЕРИАЛОВ

- Уманский А. А., Юрьев А. Б., Симачев А. С., Думова Л. В. Исследование характерных дефектов мелющих шаров, изготовленных из отбраковки непрерывнолитых заготовок рельсовых сталей 62

* * *

- Алфавитный указатель авторов статей, опубликованных в 2022 г. 67
- Тематический указатель статей, опубликованных в 2022 г. 71

CONTENTS

THERMAL AND THERMOMECHANICAL TREATMENT

- Afanas'ev V. K., Popova M. V. Use of thermocycling deformation for raising the operating properties of low-carbon steel 3
- Pustovoi V. N., Dolgachev Yu. V. Structural state of martensite and retained austenite in carbon steels after quenching in magnetic field 10

THERMOCHEMICAL TREATMENT AND COATINGS

- Polevoy E. V., Kozyrev N. A., Mikhno A. R., Usol'tsev A. A., Komarov A. A. Analysis of microstructural parameters of a layer clad from Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V powder wire 15
- Romanov D. A., Pochetukha V. V., Moskovskii S. V., Sosnin K. V., Ivanov Yu. F., Gromov V. E. Analysis of the structure and properties of Cd – Ag – N coating formed on copper by electron-ion-plasma sputtering 19
- Shlyarov V. V., Komarov A. A., Kozyrev N. A., Polevoy E. V., Mikhno A. R. Microstructure and tribological properties of metal layer deposited by arc cladding of powder wire containing titanium powder 27

ALUMINUM AND ALUMINUM ALLOYS

- Shlyarova Yu. A., Zagulyaev D. V., Gromov V. E., Ivanov Yu. F., Shlyarov V. V., Prudnikov A. N. Effect of two-stage surface modification on the structure of Al – 11% Si and Al – 20% Si silumins 34
- Puchkov Yu. A., Dung Mai Xuan, Plokhikh A. I., Benarieb I., Nazarkin R. M., Pancho Ramires W. A. Effect of cryogenic treatment and thermal shock on the residual stresses, structure and properties of alloy D16 43

ADDITIVE TECHNOLOGIES, POWDER AND COMPOSITE MATERIALS

- Min P. G., Sukhov D. I., Vadeev V. E., Rogalev A. M. Effect of heat treatment mode on the structure and mechanical properties of corrosion-resistant refractory alloy VZhL718 obtained by selective laser melting 52

CONTROL OF QUALITY OF PRODUCTION PROCESSES AND MATERIALS

- Umanskii A. A., Yur'ev A. B., Simachev A. S., Dumova L. V. Investigation of typical defects of grinding balls produced from rejected continuously cast rail steel billets 10

* * *

- Author index 67
- Name index 71

Сдано в набор 01.10.2022. Подписано к печати 20.11.2022

Формат 60×84 $\frac{1}{8}$. Бумага мелованная. Печать офсетная. Цена свободная

Усл. печ. л. 8,1. Уч.-изд. л. 9,9. Заказ 22/22

Оригинал-макет подготовлен в издательстве «Фолиум»

Отпечатано в типографии издательства «Фолиум» (127238, Москва, Дмитровское ш., 157, тел. (499)258-08-28, E-mail: info@folium.ru)

Перепечатка материалов из журнала возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Влияние двухэтапного поверхностного модифицирования на структуру силуминов Al – 11 % Si и Al – 20 % Si

Ю. А. ШЛЯРОВА¹, Д. В. ЗАГУЛЯЕВ¹, канд. техн. наук, В. Е. ГРОМОВ¹, д-р физ.-мат. наук,

Ю. Ф. ИВАНОВ², д-р физ.-мат. наук, В. В. ШЛЯРОВ¹, А. Н. ПРУДНИКОВ¹, д-р техн. наук

¹ Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия (rubannikova96@mail.ru)

² Институт Сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

Исследован доэвтектический сплав Al – 11 % Si и заэвтектический сплав Al – 20 % Si после двухэтапного модифицирования поверхности, сочетающего электровзрывное легирование с последующим облучением импульсным электронным пучком. Определена структура поверхностного слоя после двухэтапной обработки по двум режимам. Двухэтапная обработка сплава Al – 11 % Si приводит к формированию многоэлементного многофазного слоя толщиной ≈ 80 мкм, имеющий субмикро-нанокристаллическое строение. На поверхности сплава Al – 20 % Si независимо от режима модифицирования формируется два слоя — поверхностный и промежуточный, отличающиеся по структуре от силумина. Поверхностный слой многофазный и имеет толщину до 1 мкм. Переходный слой толщиной до 40 мкм сформирован ячейками высокоскоростной кристаллизации, образовавшимися в результате высокоскоростного охлаждения расплавленного слоя. Ячейки разделены тонкими прослойками, образованными наноразмерными частицами — преимущественно кремния.

Ключевые слова: Al – 20 % Si; Al – 11 % Si; двухэтапное модифицирование; микроструктура; поверхностный слой; кристаллизация.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для современного машиностроения стоит много актуальных задач: создание новых сплавов или улучшение характеристик стандартных материалов; внедрение новых технологий; энерго- и ресурсосбережение за счет выпуска экономичных и эффективных материалов для машин и технологического оборудования; повышение надежности и долговечности изделий и др. В большинстве случаев при эксплуатации деталей и механизмов в первую очередь нагрузку принимают поверхностные слои материала; именно они и привлекают наибольшее внимание ученых [1 – 4]. Срок службы деталей машин и механизмов снижается в процессе эксплуатации, происходит необратимое ухудшение их технического состояния, связанное с изнашиванием и повреждением деталей. Ежегодно миллионы деталей выбраковываются и поступают на переплавку из-за изнашивания рабочих поверхностей, хотя они могут быть восстановлены тем или иным способом. Стоимость восстановления деталей значительно ниже, чем их изготовления, так как восстановление исключает такие трудозатратные энерго- и материалоемкие процессы, как переплав (при утилизации изношенного изделия), литье, штамповка и механическая об-

работка (при изготовлении нового изделия). Во многих случаях решению этих проблем способствует широкое использование в промышленности алюминиевых сплавов, разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий их производства, создание новых конструкционных и прецизионных материалов с заранее заданными свойствами [5 – 7].

Известно, что 80 % алюминиевых отливок, производимых в мире, изготавливаются из Al – Si-сплавов — силуминов. Особенностью силумина в отличие от чистого алюминия является повышенная прочность и твердость, износ- и коррозионная стойкость за счет наличия в нем более твердого по сравнению с алюминием кремния [8]. Этим объясняется идея разработки и использования в промышленности заэвтектического силумина, в котором концентрация кремния превышает ≈ 12 % (масс.). Однако силумин такого состава характеризуется наличием крупных включений кремния, пор, трещин и т.д., что снижает его эксплуатационные свойства [9 – 13].

Поршни для автомобилей изготавливают чаще всего из эвтектических и заэвтектических силуминов с содержанием 12 – 25 % (масс.) Si. Как известно, модифицирование и микролегирование способствуют значительному улучшению комплекса механических свойств и повышению эксплуатационных ха-

Таблица 1. Химический состав сплавов Al – 11 % Si и Al – 20 % Si

Сплав	Содержание элементов, % (масс.)							
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Ni	Ti	Cr
Al – 11 % Si	84,88	11,10	0,25	2,190	0,020	0,920	0,050	0,010
Al – 20 % Si	78,52	20,28	1,14	0,072	0,015	0,006	0,006	0,001

рактических характеристик этих сплавов [14 – 18]. Работа поршня происходит в сложных и во многом опасных условиях — при трении скольжения, повышенных температурных режимах и усиленных нагрузках, поэтому особенно важно, чтобы поршни для двигателей имели высокие надежность и износостойкость. В связи с этим необходима защита трущейся поверхности поршней от износа, что достигается ее упрочнением различными методами. Процессы взаимодействия материалов с интенсивными импульсными энергетическими пучками, такими как ионные, электронные и лазерные, и их применение в промышленности привлекло большое внимание исследователей за последние несколько десятилетий.

В настоящее время наиболее перспективным методом обработки поверхности металлов и сплавов является обработка, включающая два этапа: нанесение покрытия и последующее облучение электронным пучком. Данная комбинация методов позволяет не только осуществить термическое воздействие на поверхность материала, но и легировать его поверхностный слой [19, 20]. В совокупности указанные методы воздействия на структуру и фазовый состав позволяют повысить срок службы деталей машин и механизмов. Таким образом, обработка поверхностных слоев заэвтектических силуминов является актуальной проблемой современного машиностроения.

Цель настоящей работы — анализ структурно-фазовых превращений, протекающих в поверхностном слое доэвтектического (Al – 11 % Si) и заэвтектического (Al – 20 % Si) сплавов, подвергнутых двухэтапной обработке.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали доэвтектический сплав Al – 11 % Si и заэвтектический сплав Al – 20 % Si. Содержание

легирующих элементов в силуминах определяли методом рентгеноспектрального анализа с точностью $\pm 10\%$. Результаты этого анализа приведены в табл. 1.

Модифицирование поверхностного слоя силуминов осуществляли в два этапа. На первом этапе проводили электровзрывное легирование. Материалом взрываемых проводников служили алюминиевые фольги, в качестве порошковой навески использовали оксид иттрия Y_2O_3 . Легирование осуществляли на электроразрядной установке ЭВУ 60/10 [21].

Напыление образцов проводили в вакууме по следующей технологии: на алюминиевую фольгу, зажатую между двумя коаксиальными электродами, помещали навеску порошка Y_2O_3 . Затем через вакуумный разрядник на нее подавалось напряжение и под воздействием электрического тока большой плотности происходил взрыв проводника. Продукты взрыва, которые состояли из плазменного компонента, включающего частицы Al и Y_2O_3 различной дисперсности, устремлялись по технологической камере к образцу, осаждались на нем с проплавлением поверхностных слоев силумина. Таким образом, на поверхности обрабатываемого изделия формировалось многофазное и многокомпонентное покрытие.

На втором этапе осуществляли облучение модифицированной поверхности импульсным электронным пучком. Облучение проводили на энергокомплексе “СОЛО”, разработанном и созданном в ИСЭ СО РАН (г. Томск) [22], в атмосфере аргона при давлении 0,02 Па. Режимы электровзрывного легирования и последующего облучения сплава приведены в табл. 2. Ранее в работе [23] проанализированы шесть вариантов обработки и определены оптимальные режимы электровзрывного легирования, способ-

Таблица 2. Режимы электровзрывного легирования и последующего облучения электронным пучком силуминов Al – 11 % Si и Al – 20 % Si

Режим	Электровзрывное легирование			Облучение импульсным электронным пучком				
	m_{Al} , мг	$m_{Y_2O_3}$, мг	U , кВ	E_s , Дж/см ²	W , кэВ	$t_{имп}$, мкс	n	f , с ⁻¹
1	58,9	58,9	2,8	35	18	150	3	0,3
2	58,9	88,3	2,6	25				

Обозначения: m_{Al} — масса алюминиевой фольги; $m_{Y_2O_3}$ — масса порошка оксида Y_2O_3 ; U — напряжение разряда; E_s — плотность энергии пучка электронов; W — энергия ускоренных электронов; $t_{имп}$ — длительность импульса пучка электронов; n — количество импульсов тока; f — частота следования импульсов.

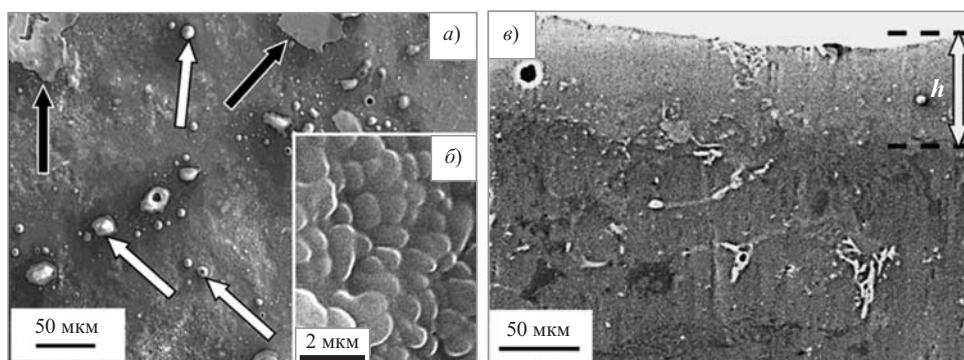


Рис. 1. Структура силумина Al – 11 % Si после двухэтапной обработки по режиму 1: *а, б* — поверхность облучения (светлые стрелки — микрокапли, темные стрелки — пленки); *в* — модифицированный слой толщиной *h* (поперечный травленный шлиф)

ствующие многократному повышению механических характеристик поверхностного слоя сплава.

Исследование фазового состава и структурных параметров образцов осуществляли методами рентгеноструктурного анализа (дифрактометр XRD-6000 на медном K_{α} -излучении). Анализ фазового состава проводили с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа POWDER CELL 2.4. Дефектную субструктуру, морфологию и локальный фазовый состав модифицированного слоя образцов силумина осуществляли методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM 2100F [24 – 26].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характерная структура поверхности силумина Al – 11 % Si, подвергнутого двухэтапной обработке по режиму 1, приведена на рис. 1. В результате такой обработки формируется поверхность, содержащая микрократеры, микрокапли и пленочные включения (рис. 1, *а*). Образующийся поверхностный слой имеет субмикроструктурное строение; размеры кристаллитов не превышают 1 мкм (рис. 1, *б*). Анализ структуры травленных поперечных шлифов показал, что толщина модифицированного слоя $h = 70 - 80$ мкм (рис. 1, *в*).

Проведен анализ фазового состава модифицированного слоя методами ПЭМ с использованием темнопольных изображений и методики расшифровки микроэлектроннограмм [24 – 26, 30]. На рис. 2, *а* показана структура поверхностного слоя модифицированного силумина Al – 11 % Si. Микроэлектроннограмма, полученная от участка на рис. 2, *б*, выделенного селективной диафрагмой, содержит дифракционное гало, соответствующее аморфному состоянию вещества, и рефлексы, формирующие дифракционные кольца (рис. 2, *в*). Анализ микроэлектроннограммы позволил выявить рефлексы кремния и силицида иттрия SiY. По результатам микрорентгеноспек-

трального анализа (рис. 2, *г*) можно предположить, что аморфной фазой является участок поверхности образца (пленка или капля), обогащенный иттрием. Одной из фаз, имеющей нанокристаллическое строение и располагающейся вдоль границы раздела капли и основного объема образца, является силицид иттрия SiY.

Характерная структура поверхности образца, подвергнутого обработке по режиму 2, представлена на рис. 3. Видно, что в результате двухэтапной обработки по режиму 2 формируется рельефная поверхность, содержащая области, различающиеся по контрасту (рис. 3, *а*). Такое различие может свидетельствовать о неоднородности элементного состава поверхностного слоя материала. Полученный поверхностный слой имеет субмикроструктурное строение, размеры кристаллитов которой не превышают 1 мкм (рис. 3, *б*).

Использование методов ПЭМ позволило обнаружить формирование в модифицированном слое градиентной субмикро- и наноразмерной структуры, характерное изображение которой приведено на рис. 4. Видно, что модифицированный слой толщиной до 70 мкм имеет структуру высокоскоростной ячеистой кристаллизации. Размеры ячеек изменяются в пределах от 0,5 до 1,2 мкм. Ячейки разделены прослойками второй фазы (рис. 4, *б*). В структуре поверхностного слоя присутствуют включения ограниченной формы (рис. 4, *а*, частицы темного цвета), размеры которых изменяются в пределах от 0,4 до 0,8 мкм. Относительное содержание таких включений снижается по мере удаления от поверхности модифицирования.

Морфологию модифицированного слоя сплава Al – 20 % Si изучали методами ПЭМ на фольгах, приготовленных из пластинок, которые вырезали из объемных образцов перпендикулярно поверхности обработки. На рис. 5 приведена характерная структура слоя, формирующегося при двухэтапной обработке. Установлено, что независимо от режима модифи-

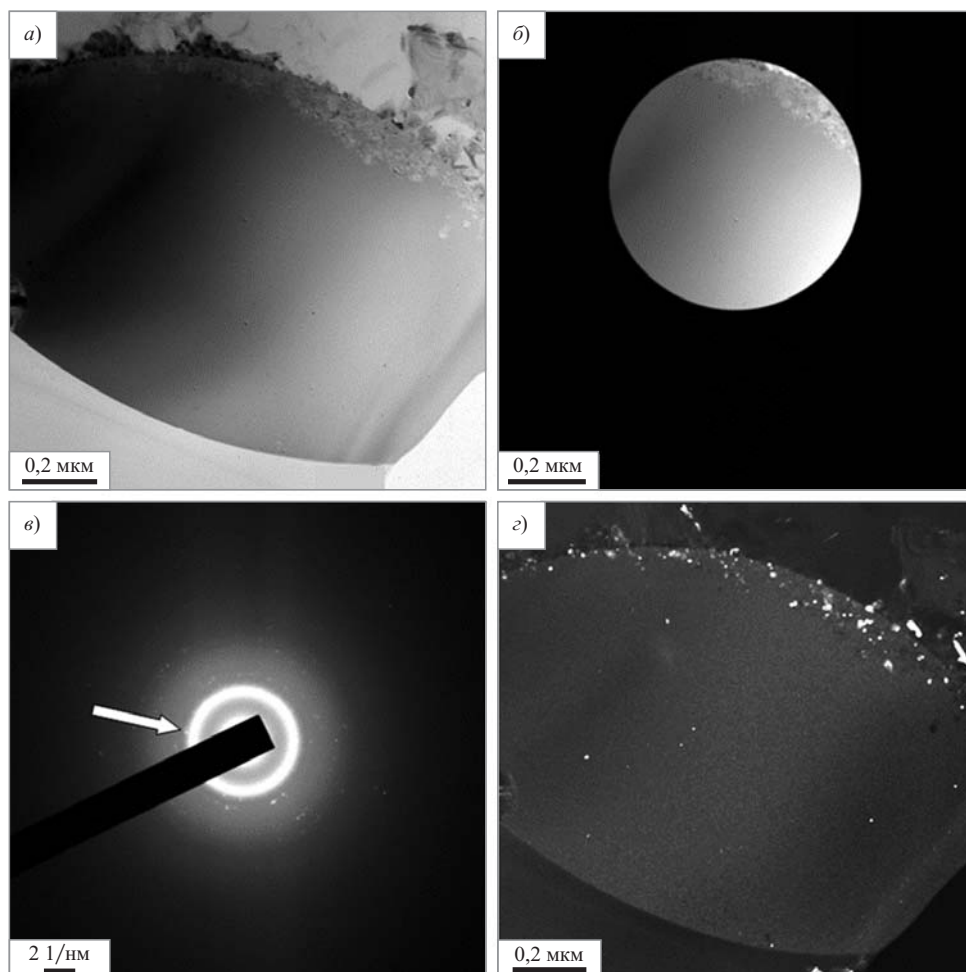


Рис. 2. Структура поверхностного слоя силумина Al – 11 % Si после двухэтапной обработки по режиму 1:

a, б — в светлом поле; *a* — общий вид; *б* — область фольги, выделенная селективной диафрагмой; *в* — микроэлектронграмма от участка в кружке на рис. 2, *б*; *г* — темное поле в рефлексе [211] Si (показан стрелкой на рис. 2, *в*)

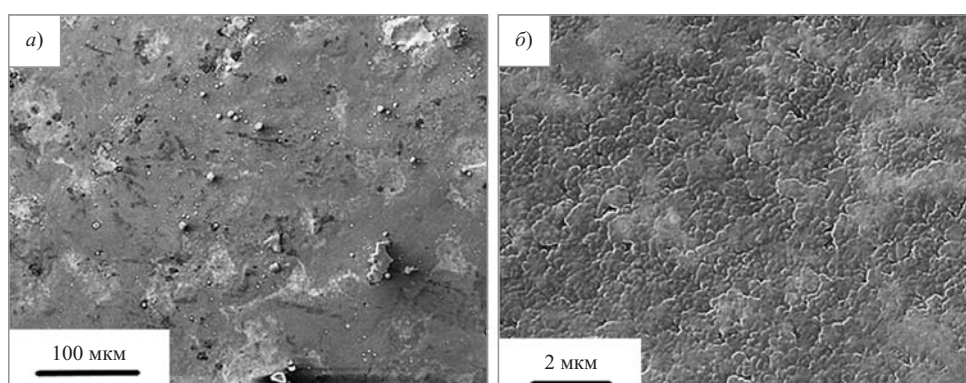


Рис. 3. Структура поверхности силумина Al – 11 % Si, модифицированной по режиму 2

цирования эта структура многослойная и состоит из поверхностного и промежуточного слоев (рис. 5, *a*).

Поверхностный слой I состоит из частиц округлой формы, размеры которых изменяются в пределах $\approx 10 - 20$ нм (рис. 5, *б*). Толщина слоя ~ 1 мкм. Мож-

но предположить, что эти частицы являются порошком оксида иттрия, модифицированным в результате взаимодействия с расплавленным поверхностным слоем подложки. Промежуточный слой II имеет структуру высокоскоростной ячеистой кристаллиза-

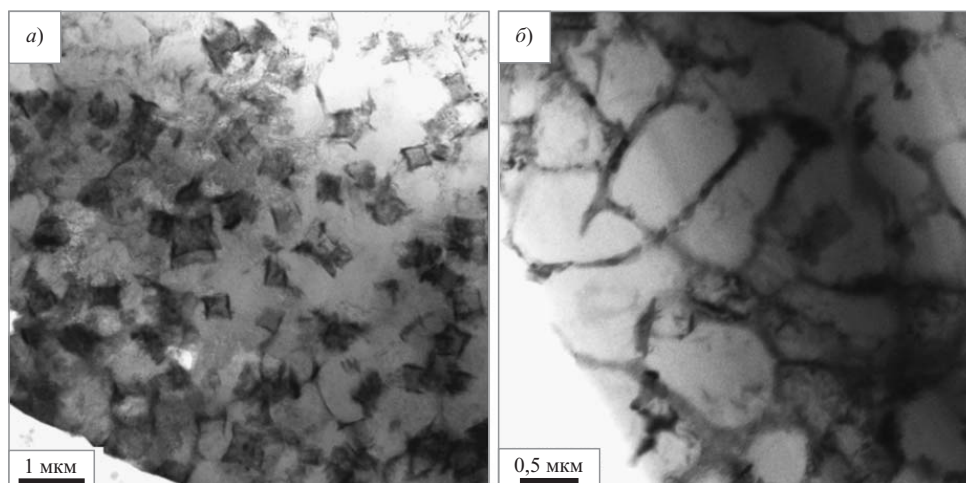


Рис. 4. Структура силумина Al – 11 % Si после двухэтапной обработки по режиму 2:
а — поверхностный слой; б — слой на расстоянии 20 – 30 мкм от поверхности

ции, характерной для силумина, обработанного импульсным электронным пучком в режиме плавления поверхностного слоя [27, 28]. Данный слой содержит включения глобулярной формы, состоящих из наноразмерных округлых частиц (рис. 5, в). Можно предположить, что эти включения являются конгломератами частиц оксида иттрия. Толщина промежуточного слоя составляет 30 – 40 мкм и увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов.

Облучение поверхностного слоя сплава Al – 20 % Si импульсным электронным пучком с плотностью энергии 35 Дж/см² после модифицирования электровзрывным методом способствует формированию в нем силицида иттрия YSi₂. При меньшей плот-

ности энергии пучка электронов это соединение в сплаве не обнаружено.

Морфологию, размеры и распределение фаз в поверхностном слое сплава Al – 20 % Si, подвергнутого двухэтапной обработке, изучали методами ПЭМ (исследование структуры в светлом и темном поле, индицирование микроэлектроннограмм [29 – 31]). На рис. 6, а, б показана структура поверхностного слоя сплава Al – 20 % Si и микродифракция от него. На темнопольных изображениях видно (рис. 6, в, г), что поверхностный слой является наноструктурным образованием и сформирован округлыми частицами. Индицирование микроэлектроннограммы, полученной от данного слоя (рис. 6, б), позволило выявить рефлексы от следующих фаз: YAl₃, Y₂Si₂O₇. Можно предположить, что рассматриваемый поверхностный слой сформировался в результате взаимодействия порошка Y₂O₃ с расплавленным поверхностным слоем сплава Al – 20 % Si, что вызвало образование фаз из элементов, присутствующих в данном слое.

На рис. 7 представлена структура переходного слоя. Видно, что слой сформирован ячейками высокоскоростной кристаллизации, образовавшимися в результате резкого охлаждения расплавленного слоя. Анализ микроэлектроннограммы дает основание заключить, что эти ячейки имеют структуру твердого раствора на основе алюминия (рис. 7, г). Ячейки разделены тонкими прослойками, состоящими из наноразмерных частиц. Индицирование микроэлектроннограммы показывает, что эти частицы являются кремнием (рис. 7, в). Анализируя результаты, представленные на рис. 7, в, можно отметить, что прослойки кремния, располагающиеся вдоль границ и в стыках границ ячеек кристаллизации, сформированных твердым раствором на основе алюминия, имеют нанокристаллическую структуру с размером кристаллитов, изменяющимся в пределах ~ 10 – 20 нм.

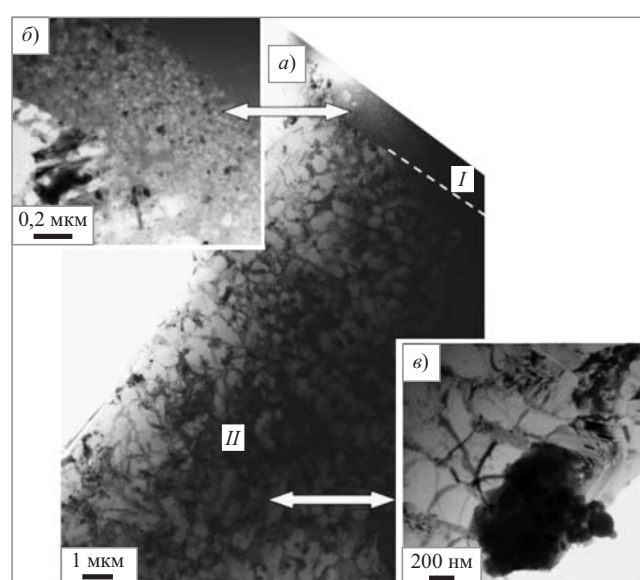


Рис. 5. Структура поверхностного слоя сплава Al – 20 % Si после двухэтапной обработки:
а — общий вид; б — поверхностный слой I; в — промежуточный слой II

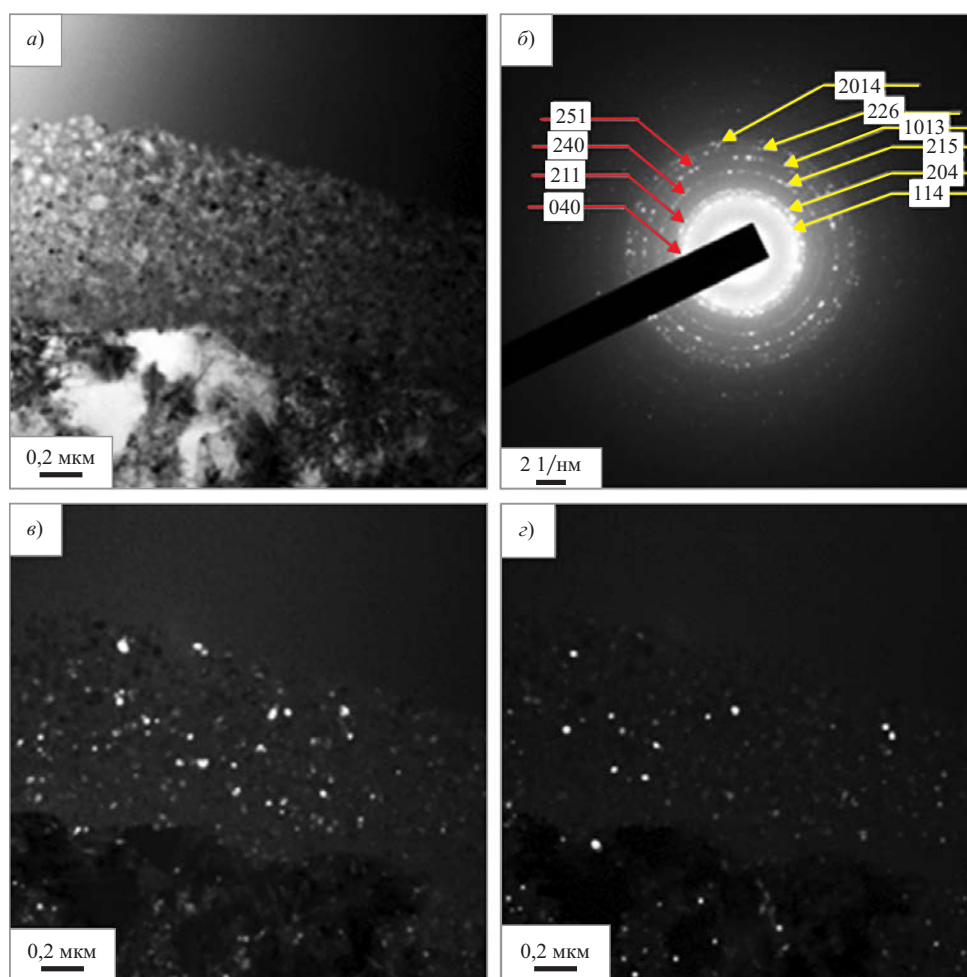


Рис. 6. Структура поверхностного слоя сплава Al – 20 % Si после двухэтапной обработки: *a* — в светлом поле; *б* — микроэлектронограмма (желтые стрелки — дифракционные кольца от YAl_3 , красные стрелки — от $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$); *в*, *г* — в темном поле (от колец на рис. 6, *б*); *в* — в рефлексах $[204]\text{YAl}_3$, $[300]\text{Y}_5\text{Si}_3$ и $[211]\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$; *г* — в рефлексах $[1013]\text{YAl}_3$, $[410]\text{Y}_5\text{Si}_3$ и $[251]\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$

На рис. 8 показана структура участка фольги со скоплением частиц сферической формы. Анализ микроэлектронограммы, полученной от этого скопления, позволил выявить рефлексы, принадлежащие кристаллической решетке фазы $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ (рис. 8, *б*). Эти данные свидетельствуют о том, что скопления порошка оксида иттрия, попавшие в расплавленный слой сплава Al – 20 % Si, могут быть легированы его элементами.

Таким образом, методами ПЭМ удастся исследовать не только морфологию и оценить размеры частиц второй фазы, но и выявить дополнительные фазы, которые не обнаруживаются методами рентгеноструктурного анализа вследствие их малого содержания в сплаве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован сплав Al – 11 % Si после двухэтапного модифицирования, включающего электровзрывное легирование с последующим облучением высо-

коинтенсивным импульсным электронным пучком. Показано, что обработка поверхности силумина по режиму 1 способствует формированию многоэлементного многофазного слоя толщиной ≈ 80 мкм, имеющего субмикро-нанокристаллическое строение. На модифицированной поверхности обнаружены застывшие капли, обогащенные атомами иттрия, находящиеся в аморфном состоянии. Двухэтапная обработка по режиму 2 вызвала кардинальное преобразование структуры поверхностного слоя толщиной ≈ 70 мкм, заключающееся в растворении включений кремния и интерметаллидов, характерных для литого состояния исследуемого силумина, и формирования градиентной многоэлементной субмикро- наноразмерной структуры.

Проведены исследования структуры, фазового состава, состояния дефектной субструктуры образцов сплава Al – 20 % Si, подвергнутых двухэтапной обработке, методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии и рентгеноструктурно-

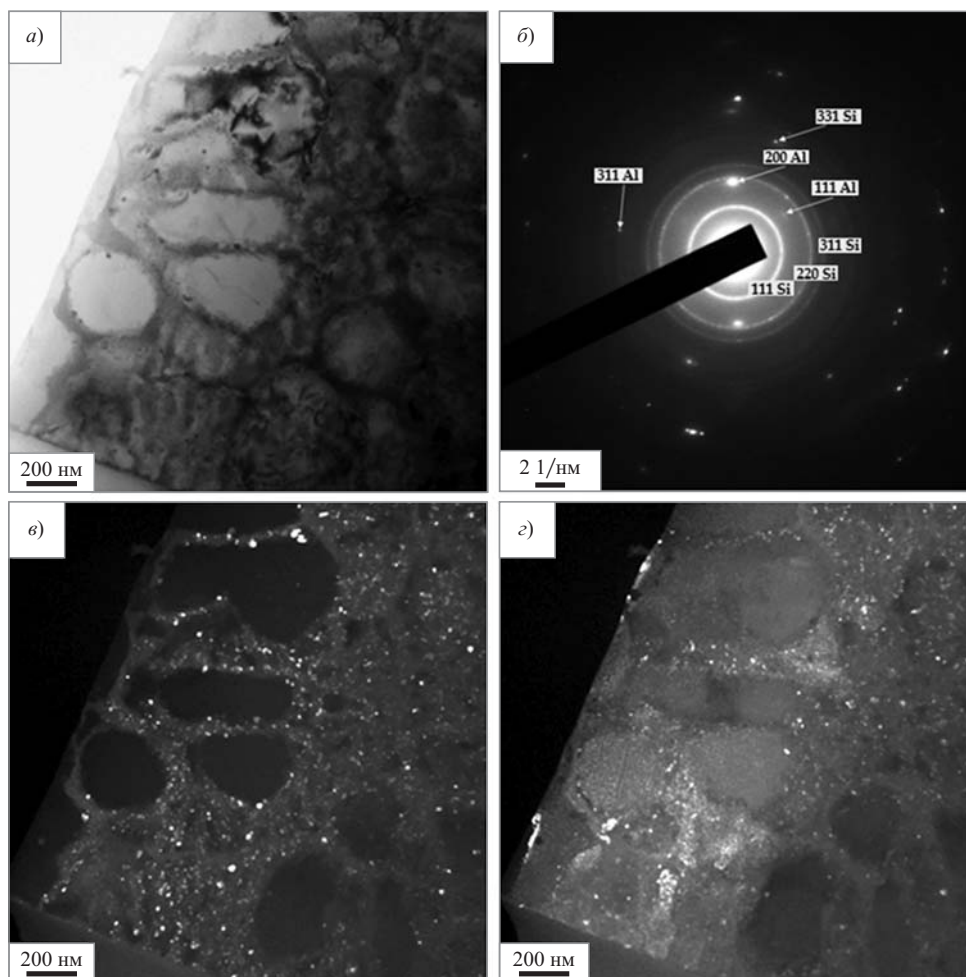


Рис. 7. Структура переходного слоя сплава Al – 20 % Si после двухэтапной обработки:
а — в светлом поле; б — микроэлектронограмма; в, г — в темном поле в рефлексах [220]Si и [200]Al соответственно

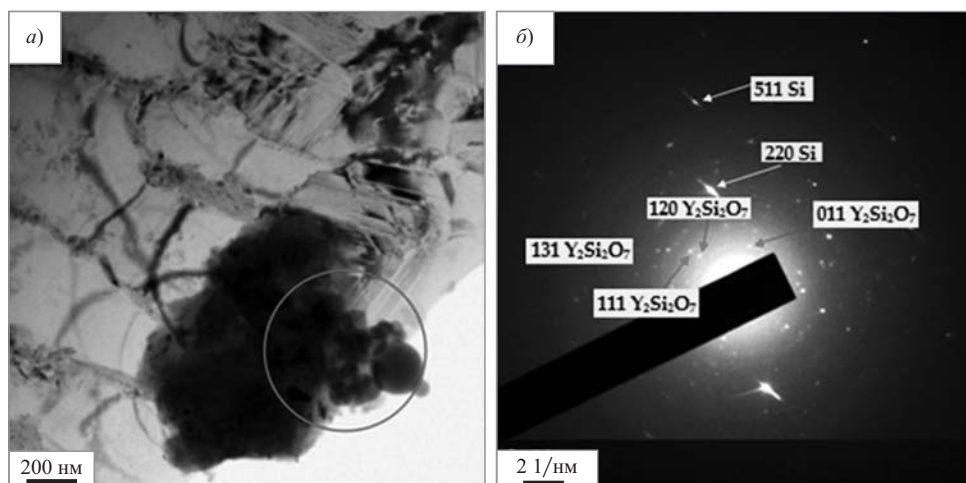


Рис. 8. Структура переходного слоя сплава Al – 20 % Si после двухэтапной обработки:
а, в — в светлом поле; б — микроэлектронограмма от участка, отмеченного селективной диафрагмой на рис. 8, а

го анализа. Установлено, что независимо от режима модифицирования на поверхности силумина форми-

руется два слоя, различающиеся по структуре, — поверхностный и промежуточный.

Поверхностный слой, толщина которого составляет порядка 1 мкм, является многофазным материалом и сформирован, предположительно, в результате взаимодействия порошка Y_2O_3 с расплавленным слоем сплава Al – 20 % Si. Переходный слой толщиной ≈ 40 мкм состоит из ячеек высокоскоростной кристаллизации, образовавшихся при высокоскоростном охлаждении расплавленного слоя сплава Al – 20 % Si. Ячейки разделены тонкими прослойками из наноразмерных частиц преимущественно кремния. В объеме переходного слоя присутствуют также скопления частиц сферической формы, сформировавшиеся на базе частиц порошка оксида иттрия, попавших в расплавленный слой Al – 20 % Si и затем легированных элементами, входящими в исходный силумин. Установлено также, что в промежуточном слое, образующемся в результате высокоскоростной кристаллизации, формируются твердые растворы на основе кристаллических решеток алюминия и кремния, обогащенных атомами иттрия.

Двухэтапная обработка, включающая электро-взрывное легирование с последующим облучением электронным пучком, может быть рекомендована для модифицирования поверхности как доэвтектических, так и заэвтектических силуминов.

Исследование выполнено за счет гранта Российской государственной научной фонды № 19-79-10059, <https://rscf.ru/project/19-79-10059/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blutmager A., Varga M., Cihak-Bayr U. et al. Wear in hard metal check valves: In-situ surface modification through tribolayer formation in dry contact // *Vacuum*. 2021. V. 192. P. 110482.
2. Jiang H., Ren Z., Yi Y. et al. Effect of machining on performance enhancement of superficial layer of high-strength alloy steel // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. V. 14. P. 1065 – 1079.
3. Liu Z., Zhang H., Yan Z., Dong P. Enhanced fatigue performance of aluminum alloy through surface strengthening treatment // *Materials Letters*. 2022. V. 306. P. 130864.
4. Zhou J., Han X., Li H. et al. Investigation of layer-by-layer laser remelting to improve surface quality, microstructure, and mechanical properties of laser powder bed fused AlSi10Mg alloy // *Materials & Design*. 2021. V. 210. P. 110092.
5. Kagramanian A., Stankevich P., Aulin D., Basov A. Efficiency improvement of locomotive-type diesel engine operation due to introduction of resource-saving technologies for cleaning diesel and diesel locomotive systems // *Procedia Computer Science*. 2019. V. 149. P. 264 – 273.
6. Denkena B., Ditttrich M.-A., Liu Y., Theuer M. Automatic regeneration of cemented carbide tools for a resource efficient tool production // *Procedia Manufacturing*. 2018. V. 21. P. 259 – 265.
7. Fanghänel C., Rautenstrauch A., Symmank C. et al. Multidimensional analysis of process chains regarding the resource-efficient manufacturing of hybrid structures // *Procedia CIRP*. 2015. V. 26. P. 595 – 600.
8. Polmear I., StJohn D., Nie J. F., Qian M. Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals (fifth ed.). Boston: Butterworth-Heinemann, 2017. 544 p.
9. Li R., Liu L., Zhang L. et al. Effect of squeeze casting on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al – xSi alloys // *Journal of Materials Science & Technology*. 2017. V. 33, Is. 4. P. 404 – 410.
10. Jung J.-G., Ahn T.-Y., Cho Y.-H. et al. Synergistic effect of ultrasonic melt treatment and fast cooling on the refinement of primary Si in a hypereutectic Al – Si alloy // *Acta Materialia*. 2018. V. 144. P. 31 – 40.
11. Lu Z., Zhang L., Wang J. et al. Understanding of strengthening and toughening mechanisms for Sc-modified Al – Si – (Mg) series casting alloys designed by computational thermodynamics // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. V. 805. P. 415 – 425.
12. Cai Z., Zhang C., Wang R. et al. Effect of solidification rate on the coarsening behavior of precipitate in rapidly solidified Al – Si alloy // *Progress in Natural Science: Materials International*. 2016. V. 26, Is. 4. P. 391 – 397.
13. Biroi Y. Microstructural evolution during annealing of a rapidly solidified Al – 12 Si alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2007. V. 439, Is. 1 – 2. P. 81 – 86.
14. Farag O. F. Comparison of the effect of plasma treatment and gamma ray irradiation on PS – Cu nanocomposite films surface // *Results in Physics*. 2018. V. 9. P. 91 – 99.
15. Wei D., Wang X., Wang R., Cui H. Surface modification of 5CrMnMo steel with continuous scanning electron beam process // *Vacuum*. 2018. V. 149. P. 118 – 123.
16. Zaguliaev D. V., Ivanov Yu. F., Klopotov A. A. et al. Evolution of strength properties and defect sub-structure of the hypoeutectic A319.0 alloy irradiated by a pulsed electron beam and fractured under tensile stress // *Materialia*. 2021. V. 20. P. 101223.
17. Zaguliaev D., Ivanov Yu., Konovalov S. et al. Effect of pulsed electron beam treatment on microstructure and functional properties of Al – 5.4Si – 1.3Cu alloy // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2021. V. 488. P. 23 – 29.
18. Kang N., Mansori M. E. L. A new insight on induced-tribological behaviour of hypereutectic Al – Si alloys manufactured by selective laser melting // *Tribology International*. 2020. P. 105751.
19. Zaguliaev D., Gromov V., Rubannikova Yu. et al. Structure and phase states modification of Al – 11 Si – 2Cu alloy processed by ion-plasma jet and pulsed electron beam // *Surface and Coatings Technology*. 2020. V. 383. P. 125246.
20. Ivanov Yu., Gromov V., Zaguliaev D., Glezer A. et al. Modification of surface layer of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying followed by electron beam processing // *Materials Letters*. 2019. V. 253. P. 55 – 58.
21. Romanov D. A., Budovskikh E. A., Zhmakin Y. D., Gromov V. E. Surface modification by the EVU 60/10 electroexplosive system // *Steel in Translation*. 2011. V. 41, No. 6. P. 464 – 468.
22. Коваль Н. Н., Иванов Ю. Ф. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 304 с.
23. Громов В. Е., Загуляев Д. В., Иванов Ю. Ф. и др. Структура и упрочнение силумина, модифицированного электронно-ионной плазмой: монография. Новокузнецк: Издательский центр СибГИУ, 2020. 285 с.
24. Egerton F. R. Physical Principles of Electron Microscopy. Basel: Springer International Publishing, 2016. 196 p.
25. Kumar C. S. S. R. Transmission Electron Microscopy. Characterization of Nanomaterials. New York: Springer, 2014. 717 p.
26. Carter C. B., Williams D. B. Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 2016. 518 p.
27. Zaguliaev D., Ivanov Yu., Konovalov S. et al. Effect of electron-plasma treatment on the microstructure of Al – 11 wt% Si alloy // *Materials Research*. 2020. V. 23(2). P. e20200057.

28. Zaguliaev D., Konovalov S., Ivanov Y. et al. Microstructure and microhardness of piston alloy Al – 10Si – 2Cu irradiated by pulsed electron beam // Archives of foundry engineering. 2020. V. 20, No. 3. P. 92 – 98.
29. Банных О. А., Будберг П. Б., Алисова С. П. и др. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
30. Утевский Л. М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. М.: Металлургия, 1973. 533 с.
31. Томас Г., Гориндж М. Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. М.: Наука, 1983. 320 с.

Статья поступила в редакцию 07.07.2022 г.

Effect of two-stage surface modification on the structure of Al – 11% Si and Al – 20% Si silumins

Yu. A. Shlyarova¹, D. V. Zagulyaev¹, V. E. Gromov¹, Yu. F. Ivanov², V. V. Shlyarov¹, and A. N. Prudnikov¹

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

² Institute of High-Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

Al – 11% Si hypoeutectic alloy and Al – 20% Si hypereutectic alloy are studied after two-stage modification of the surface, which combines electroerosion alloying and subsequent irradiation with a pulse electron beam. The structure of the surface layer is determined after two variants of two-stage treatment. The two-stage treatment of alloy Al – 11% Si yields a multi-element multiphase layer with a thickness of about 80 μm and a submicro-nanocrystalline structure. The surface of alloy Al – 20% Si acquires two layers (a surface one and an intermediate one) differing in the structure from the silumin. The surface layer contains many phases and is up to 1 μm thick. The transition layer with a thickness of up to 40 μm is formed from rapid-crystallization cells produced by the high-rate cooling of the fused layer of alloy Al – 20% Si. The cells are separated by thin sublayers composed of chiefly silicon nanosize particles.

Key words: Al – 20% Si, two-stage modifying, microstructure, surface layer, crystallization.