Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 12

ТВЕРЬ 2020

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2020. – Вып. 12. – 908 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2020

© Тверской государственный университет, 2020

УДК 621.785:669.14.08

Оригинальная статья

СТРУКТУРНО-ФАЗОВОЕ СОСТОЯНИЕ СИЛУМИНА ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СОСТАВА, ОБЛУЧЕННОГО ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Ю.Ф. Иванов¹, А.А. Клопотов², Е.А. Петрикова¹, М.Е. Рыгина^{1,3}, О.С. Толкачев¹,
В.Д. Клопотов³

¹ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»
634055, Россия, Томск, пр-т Академический, 2/3

²ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»
634002, Россия, Томск, пл. Соляная, 2

³ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический
университет»

634050, Россия, Томск, пр-т Ленина, 30

klopotovaa@tsuab.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.089

Аннотация: Силумин (сплав алюминия с кремнием) является дешевым промышленным сплавом, обладающим хорошей коррозионной стойкостью, высокими удельными механическими свойствами и хорошими литейными свойствами, вследствие чего нашел широкое применение в современной промышленности (авиа- и машиностроение, приборостроение, судостроение и т.д.). Целью настоящей работы является анализ закономерностей преобразования структуры и фазового состава поверхностного слоя силумина заэвтектического состава ($Al-22$ вес. % Si), подвергнутого облучению интенсивным импульсным электронным пучком. Установлено, что облучение силумина импульсным электронным пучком (18 кэВ, 25 Дж/см², 200 мкс, 3 имп., 0,3 с⁻¹) приводит к плавлению поверхностного слоя толщиной до 60 мкм, высокоскоростная кристаллизация которого сопровождается формированием субмикро- нанокристаллической многофазной структуры. Показано, что алюминий (твердый раствор на основе ГЦК кристаллической решетки) формирует ячейки высокоскоростной кристаллизации; на границах ячеек расположены наноразмерные частицы вторых фаз. Выполнен анализ трехкомпонентных диаграмм состояния системы $Al-Si-Fe-Cu$ (основные элементы исследуемого силумина) и продемонстрирована возможность формирования в сплаве в равновесных условиях большого количества двух- и трехэлементных соединений. Методами дифракционной электронной микроскопии показано, что наряду с трехэлементными фазами в силумине образуются и фазы на основе четырех и, возможно, большего количества элементов.

Ключевые слова: силумин заэвтектического состава, импульсный электронный пучок, элементный и фазовый состав, дефектная субструктура, диаграммы равновесия.

1. Введение

Силумин – сплав алюминия с кремнием, концентрация кремния в котором может изменяться от единиц до десятков процентов. Силумины являются дешевым промышленным сплавом, обладают хорошей коррозионной стойкостью и хорошими литейными свойствами, малым удельным весом [1-3]. Заэвтектический силумин содержит в своем составе свыше 12 вес. % кремния, что обеспечивает его более высокие прочностные и трибологические свойства и, соответственно, повышенную

перспективность для использования в авиа- и машиностроении, приборостроении и т.д. [1-3]. Однако увеличение в сплаве концентрации кремния сопровождается повышением газонасыщения материала, что приводит к росту количества и размеров пор, достигающих нескольких десятков микрометров, и, соответственно, к снижению служебных характеристик изделия. Другим существенным недостатком силуминов заэвтектического состава является наличие крупных (сотни микрометров) кристаллов первичного кремния, охрупчивающих материал. В совокупности, указанные и некоторые другие недостатки силуминов заэвтектического состава существенным образом сужают сферу применения данного, несомненно, перспективного сплава в промышленности.

В ряде работ, выполненных на силуминах доэвтектического и эвтектического состава, показано, что облучения сплава интенсивным импульсным электронным пучком в режиме высокоскоростного плавления поверхностного слоя приводит к формированию структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации, размеры включений кремния в которой изменяются в пределах до 100 нм [4-8]. Облученные образцы характеризуются повышенными значениями прочности и пластичности, износостойкости и усталостной долговечности [4, 9-13].

Целью настоящей работы является анализ закономерностей преобразования структуры и фазового состава поверхностного слоя силумина заэвтектического состава, подвергнутого облучению интенсивным импульсным электронным пучком.

2. Материал и методики исследования

В качестве материала исследований использованы образцы силумина следующего состава 22 % $Si-Al$ – в литом состоянии. Образцы имели форму пластинок размерами 15×15×8 мм. Облучение силумина осуществляли на установке «СОЛО» [9] при следующих параметрах: энергия электронов 18 кэВ; плотность энергии пучка электронов 25 Дж/см²; длительность импульса 200 мкс; частота следования импульсов 0,3 с⁻¹; количество импульсов 3; давление остаточного газа (аргон) в рабочей камере установки 0,02 Па. Исследование элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры силумина в исходном состоянии и после облучения осуществляли методами сканирующей (прибор SEM 515 Philips) и просвечивающей дифракционной (прибор JEM-2100F) электронной микроскопии.

3. Результаты и обсуждение

Методами сканирующей электронной микроскопии установлено, что

облучение силумина импульсным электронным пучком с указанными параметрами приводит к плавлению поверхностного слоя толщиной до 60 мкм. На поверхности облучения выявляется незначительное количество микрократеров (см. рис. 1 а). В результате высокоскоростной кристаллизации наблюдается формирование структуры ячеистого типа (см. рис. 1 б). Размер ячеек изменяется в пределах 150–350 нм.

Методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что наряду с алюминием и кремнием, исследуемый сплав содержит атомы магния, железа и меди (см. рис. 1 в). Кроме этого в незначительном количестве в образцах были обнаружены атомы никеля, марганца и цинка. Следовательно, данный сплав является многоэлементным по составу.

Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца силумина, облученного импульсным электронным пучком (а, б); в – результаты микрорентгеноспектрального анализа участка поверхности облученного силумина.

Методами просвечивающей электронной микроскопии в режиме сканирования (STEM анализ) были проведены исследования

распределения выявленных элементов в структуре поверхностного слоя облученного силумина. Результаты исследований приведены на рис. 2.

Анализируя результаты, представленные на рис. 2, можно отметить, что ячейки кристаллизации сформированы преимущественно атомами алюминия (см. рис. 2 б). Атомы кремния присутствуют как на границах, так и в объеме ячеек в виде образований пластинчатой (лентообразной) формы (см. рис. 2 в). Атомы железа, меди и никеля располагаются преимущественно по границам ячеек кристаллизации (см. рис. 2 г-е).

Предваряя исследование фазового состава сплава, был выполнен анализ диаграмм равновесия с целью прогнозирования фазообразования в облученном сплаве.

Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности образца силумина, облученного импульсным электронным пучком (а); б-е – изображения участка (а), полученные в характеристическом рентгеновском излучении атомов Al (б), Si (в), Fe (г), Cu (д) и Ni (е).

Диаграмма состояния системы Al-Cu-Si

В тройной системе Al-Cu-Si внутри изотермического треугольника

образуется только одно трехкомпонентное соединение на основе k -фазы (прототип Mg , символ Пирсона $hP2$) при 400°C (см. рис. 3). Остальные трехкомпонентные соединения в системе $Al-Cu-Si$ образуются на основе бинарных соединений диаграмм состояний $Al-Cu$ и $Cu-Si$. Необходимо отметить, что в медном углу изотермического $Al-Cu-Si$ треугольника установлено существование только одного с заметной по размерам областью гомогенности двухкомпонентного соединения γ_1 -фаза (Cu_9Al_4 , $cP52$). Это соединение образуется на стороне изотермического треугольника $Al-Cu$. В основном площадь изотермического треугольника занята трехфазными областями: $(Si) + \theta - CuAl_2 + \eta - AlCu$ ($mC20$), $(Si) + \eta - AlCu + \zeta - Cu_{11.5}Al_9$ ($oI25$), $(Al) + (Si) + \theta - CuAl_2$ ($tI2$), $(Si) + \eta(CuSi) + \gamma_1$ и др. [14,15].

Рис. 3. Изотермическое сечение тройной системы $Al-Cu-Si$ при 500°C [14] (а) и фрагмент тройной диаграммы системы $Al-Cu-Si$ при 400°C (б) [15]

Диаграмма состояния системы $Al-Cu-Fe$

В работе [16] в тройной системе $Al-Cu-Fe$ внутри изотермического треугольника установлено образование трех трехкомпонентных соединений: $\psi - FeCu_2Al_6$ (прототип $Mg_{23}(Al,Zn)_{49}$, символ Пирсона $cI62$), $\omega - FeCu_2Al_7$ (Al_7Cu_2Fe , $tP40$), $\Phi - FeCu_{10}Al_{10}$ ($\delta - Ni_2Al$, $hP5$) (см. рис. 4 а). Фазы $\psi - FeCu_2Al_6$ и $\Phi - FeCu_{10}Al_{10}$ имеют небольшие области гомогенности. Область гомогенности, занимаемая фазой $\omega - FeCu_2Al_7$, раза в три больше областей гомогенности фаз $\psi - FeCu_2Al_6$ и $\Phi - FeCu_{10}Al_{10}$. Значительную

площадь в изотермическом треугольнике занимает фаза $\beta-(Fe_xCu_yAl_z)$ ($CsCl, cP8$) ($0 < x < 1$, $0 < y < 1$, $\sim 0,23 < z \leq 0,70$) [16,17].

Кроме того в работе [18] внутри изотермического треугольника $Al-Cu-Fe$ выявлено наличие еще трех трехкомпонентных фаз $\tau_2-FeCu_2Al_7$ (Al_7Cu_2Fe , $tP40$), $\tau_3-FeCu_{10}Al_{10}$ ($\delta-Ni_2Al$, $hP5$), $\tau_i-Fe_{12,5}Cu_{25,5}Al_{62}$ ($Mg_{23}(Al,Zn)_{49}$, $cI62$) с узкими областями гомогенности (см. рис. 4 б). Большое количество трехкомпонентных соединений в системе $Al-Cu-Fe$ с маленькими областями гомогенности образуются на основе бинарных соединений диаграмм состояний $Al-Cu$ и $Cu-Fe$.

Рис. 4. Изотермическое сечение тройной системы $Al-Cu-Fe$ при $600^\circ C$ [16] (а) и фрагмент изотермического сечения тройной системы $Al-Cu-Fe$ при $645^\circ C$ [18] (б).

Диаграмма состояния системы $Al-Fe-Si$

Структурно-фазовые состояния в этой системе очень сложные. Это находит отражение в разном строении диаграмм состояний системы $Al-Fe-Si$, предложенных разными авторами [19-21] (см. рис. 5 и рис. 6). В области Fe угла изотермического треугольника существует две области трехкомпонентного твердого раствора на основе разупорядоченной ОЦК решетки $\alpha(Fe,Al,Si)$ и на основе разупорядоченной ГЦК решетки $\gamma(Fe,Al,Si)$. На основе двухкомпонентного соединения $FeSi$ ($cP8$) существует протяженная область гомогенности трехкомпонентного соединения $FeSi_{1-x}Al_x$. Видно, что другие трехкомпонентные соединения на основе двойных соединений имеют очень небольшие по площади области гомогенности. Также в этой системе внутри изотермического треугольника

существует значительное количество интерметаллических трехкомпонентных соединений с узкими областями гомогенности: $\tau_1/\tau_2 - Fe_3Al_2Si_3$ ($Fe_3Al_2Si_3$, *aP16*), $\tau_2 - Fe_2Al_5Si_2$ (*mC**), $\tau_3 - Fe_5Al_9Si_5$ ($FeAl_2Si$, *oC128*), τ_4 , $\delta - FeAl_3Si_3$ ($PdGa_5$, *lI24*), $\tau_5 - Fe_2Al_{7,4}Si$ ($Fe_2Al_{7,4}Si$, *hP245*), $\tau_6 - Fe_2Al_9Si_2$ ($Fe_2Al_9Si_2$, *C2/c*), $\tau_7 - Fe_{22}Al_{40}Si_{38}$ ($Fe_2Al_3Si_3$, *P2_1/c*), $\tau_8 - Fe_3Al_2Si_4$ ($Fe_3Al_2Si_4$, *oC36*), $\tau_{10} - Fe_5Al_{12}Si_3$ (Mn_3Al_{10} , *hP26*).

Рис. 5. Изотермическое сечение тройной системы $Al - Fe - Si$ при 600 °C [19].

Рис. 6. Изотермическое сечение тройной системы $Al - Fe - Si$ при 600 °C [20,21].

Диаграмма состояния системы $Cu - Fe - Si$.

Изотермическое сечение тройной системы приведено на рис. 7.

Рис. 7. Изотермическое сечение тройной системы $Cu - Fe - Si$ при 900 °C [22].

В этой системе внутри изотермического треугольника не обнаружено

интерметаллических соединений с узкими областями гомогенности. В области Fe угла изотермического треугольника существует область трехкомпонентного твердого раствора на основе разупорядоченной ОЦК решетки: $\alpha(Fe, Cu, Si)$.

Рис. 8. Электронно-микроскопическое изображение структуры заэвтектического силумина, подвергнутого облучению импульсным электронным пучком; а – светлое поле; б – микроэлектронограмма (стрелками указаны рефлексы, в которых получены темные поля: 1 – (в), 2 – (г)); в, г – темные поля, полученные в рефлексах $[111]Si$ и $[202]Al_8Si_6Mg_3Fe$, соответственно.

Анализируя результаты, представленные на рис. 3-7, можно отметить огромное многообразие двойных, тройных и, что весьма вероятно, четверных соединений, образование которых возможно в поверхностном

слое исследуемого сплава в результате облучения поверхности интенсивным импульсным электронным пучком в режиме высокоскоростного плавления. Однако, методами рентгенофазового анализа удается однозначно выявить лишь две фазы: твердые растворы на основе кристаллических решеток алюминия и кремния. Можно предположить, что причиной этому может быть незначительная концентрация легирующих (медь, никель, магний) и примесных (железо) элементов, а также высокая дисперсность частиц. Тогда как при электровзрывном легировании *Ti* и *B* и последующем облучении импульсным электронным пучком поверхностного слоя силумина структурными методами установлено в поверхностном слое формирование многофазной структуры состава *Al*, *Ti*, *TiAl*, *Al₂Ti*, *AlTi₃*, *Al₃Ti*, *TiB*, *Ti₅Si₄*, *Ti₇Al₅Si₁₂* [23].

Методы просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, обладая высокой разрешающей способностью, позволяют проводить анализ фазового состава материала в малых объемах. Пример подобного анализа приведен на рис. 8.

Анализ результатов, полученных методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии, показывает, что формирующиеся частицы вторых фаз относятся к наноразмерным образованиям (8–15 нм), располагаются преимущественно на границах раздела ячеек кристаллизации и могут быть образованы как одним элементом (*Si*) так и несколькими (*AlSiMgFe*). Следует также отметить хорошее согласие результатов, полученных методами микрорентгеноспектрального и микродифракционного анализа, представленных на рис. 2 и рис. 8.

4. Заключение

Установлено, что облучение силумина заэвтектического состава (*Al*–22 вес. % *Si*) интенсивным импульсным электронным пучком (18 кэВ, 25 Дж/см², 200 мкс, 3 имп., 0,3 с⁻¹) приводит к плавлению поверхностного слоя толщиной до 60 мкм с последующим формированием многофазной структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации субмикронаноразмерного диапазона. Выявлено наличие в сплаве кроме алюминия и кремния, атомов меди, железа, магния, никеля, марганца, цинка. Показано, что объем ячеек сформирован твердым раствором на основе алюминия; на границах ячеек расположены частицы вторых фаз. Анализ трехкомпонентных диаграмм состояния системы *Al–Si–Fe–Cu* (основные элементы исследуемого силумина) выявил возможность формирования в равновесных условиях большого количества двух- и трехэлементных соединений. Методами дифракционной электронной микроскопии

показано, что наряду с трехэлементными фазами в силумине образуются и фазы на основе четырех и, возможно, большего количества элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект № 19-19-00183; анализ диаграмм равновесия) и гранта РФФИ-БРФФИ (проект № 19-52-04009; анализ структуры методами электронной микроскопии).

Библиографический список:

1. **Белов, Н.А.** Фазовый состав и структура силуминов: Справочное издание / Н.А. Белов, С.В. Савченко, А.В. Хван. – М.: Изд-во МИСиС, 2001. – 283 с.
2. **Строганов, Г.Б.** Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. – М.: Металлургия, 1977. – 272 с.
3. **Белов, Н.А.** Поршневые силумины / Н.А. Белов, В.Д. Белов, С.В. Савченко и др. – М: Издательский дом «Руда и металлы», 2011. – 248 с.
4. Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой / А.П. Ласковнев, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова и др.; под ред. А.П. Ласковнева. – Минск: Беларуская Навука, 2013. – 287 с.
5. **Ivanov, Yu.F.** Microstructure and properties of hypoeutectic silumin treated by high-current pulsed electron beams / Yu.F. Ivanov, D.V. Zagulyaev, S.A. Nevskii, et al. // Progress in Physics of Metals. – 2019. – V. 20. – I. 3. – P. 447-484.
6. **Ivanov, Yu.** Modification of surface layer of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying followed by electron beam processing / Yu. Ivanov, V. Gromov, D. Zaguliaev, et al. // Materials Letters. – 2019. – V. 253. – P. 55-58. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.05.148.
7. **Ivanov, Yu.F.** Changes in surface structure and mechanical characteristics of Al–5 wt% Si alloy after irradiation by electron beam / Yu.F. Ivanov, D.V. Zaguliaev, A.M. Glezer, et al. // Materials Letters. – 2020. – V. 275. – Art. № 128105. – 4 p. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128105.
8. **Sarychev, V.** Model of nanostructure formation in Al–Si alloy at electron beam treatment / V. Sarychev, S. Nevskii, S. Konovalov, A. Granovskii, Y. Ivanov, V. Gromov // Materials Research Express. –2019. – V. 6. – I. 2. – Art. № 026540. – 14 p. DOI: 10.1088/2053-1591/aec1f.
9. Электронно-ионно-плазменная модификация поверхности цветных металлов и сплавов / под общ. ред. Н.Н. Коваля и Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 312 с.
10. **Иванов, Ю.Ф.** Усталость силумина, модифицированного электронно-пучковой обработкой / Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, С.В. Коновалов, К.В. Аксенова. – Новокузнецк: Изд-во «Полиграфист», 2016. – 184 с.
11. **Konovalov, S.V.** Fatigue life of silumin irradiated by high intensity pulsed electron beam / S.V. Konovalov, K.V. Alsaraeva, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, VI International Scientific Practical Conference on Innovative Technologies and Economics in Engineering, 21-23 May 2015, Yurga, Russia. – 2015. – V. 91. – Art. № 012029. – 6 p. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012029.
12. **Konovalov, S.V.** Fatigue variation of surface properties of silumin subjected to electron-beam treatment / S.V. Konovalov, K.V. Aksenova, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, O.A. Semina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 110. – Art. № 012012. – 5 p. DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012012.
13. **Gromov, V.E.** Structural evolution of silumin treated with a high intensity pulse electron

- beam and subsequent fatigue loading up to failure / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, A.M. Glezer, S.V. Konovalov, K.V. Alsaraeva // Bulletin of the Russian Academy of Sciences-Physics. – 2015. – V. 79. – I. 9. – P. 1169-1172. DOI: 10.3103/S1062873815090087.
14. **Ponweiser, N.** New investigation of phase equilibria in the system $Al-Cu-Si$ / N. Ponweiser, K.W. Richter // Journal of Alloys and Compound. – 2012. – V. 512. – I. 1. – P. 252-263. DOI: /10.1016/j.jallcom.2011.09.076.
15. **He, C.-Y.** Experimental investigation and thermodynamic modeling of the $Al-Cu-Si$ system / C.-Y. He, Y. Du, H.-L. Chen, H. Xu // CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. – 2009. – V. 33. – I. 1. – P. 200-210. DOI: 10.1016/j.calphad.2008.07.015.
16. **Баннх, О.А.** Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справочник / О.А. Баннх, П.Б. Будберг, С.П. Алисова и др.; под ред. О.А. Баннх, М.Е. Дрица. – М.: Металлургия, 1986. – 440 с.
17. **Kalmykov, K.B.** Phase equilibria in the system $Al-Cu-Si$ at a temperature of 853 K in the aluminum enriched region / K.B. Kalmykov, N.L. Zvereva, S.F. Dunaev, et. al. // Moscow University Chemistry Bulletin. – 2009. – V. 64. – I. 2. – P. 99-103. DOI: 10.3103/S0027131409020060.
18. **Zhang, L.M.** Phase diagram of the $Al-Cu-Fe$ quasicrystal-forming alloy system. III. Isothermal sections / L.M. Zhang, R. Lück // International Journal of Materials Research. – 2003. – V. 94. – I. 2. – P. 108-115. DOI: 10.3139/146.030108.
19. **Du, Y.** A thermodynamic description of the $Al-Fe-Si$ system over the whole composition and temperature ranges *via* a hybrid approach of CALPHAD and key experiments / Y. Du, J.C. Schuster, Z.-K. Liu, et. al. // Intermetallics. – 2008. – V.16. – I. 4. – P. 554-570. DOI: 10.1016/j.intermet.2008.01.003.
20. **Dons, A.L.** $AlFeSi$ -particles in commercial pure aluminum / A.L. Dons // Zeitschrift für Metallkunde. – 1984. – V. 75. – I. 2. – P. 170-174.
21. **Miyazaki, T.** Phase decomposition of $Fe-Si-Al$ ordered alloys / T. Miyazaki, T. Kozakai, T. Tsuzuki // Journal of Materials Science. – 1986. – V. 21. – I. 7. – P. 2557-2564. DOI: 10.1007/BF01114307.
22. **Wang, C.P.** Phase equilibria in $Fe-Cu-X$ ($X: Co, Cr, Si, V$) ternary systems / C.P. Wang, X.J. Liu, I. Ohnuma, et. al. // Journal of Phase Equilibria. – 2002. – V. 23. – № 3. – P. 236-245. DOI: 10.1361/105497102770331712.
23. **Клопотов, А.А.** Структурно-фазовые состояния поверхностного слоя сплава $Al-Si$ после электронно-ионно-плазменной обработки / А.А. Клопотов, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Петрикова, и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2014. – Вып. 6. – С. 162-170.

References:

1. **Belov, N.A.** Fazovyi sostav i struktura siluminov: Spravochnoe izdanie [Phase composition and structure of silumins: A reference edition] / N.A. Belov, S.V. Savchenko, A.V. Khvan. – М.: Izd-vo MISIS, 2001. – 283 p. (In Russian).
2. **Stroganov, G.B.** Splavy alyuminiya s kremniem [Alloys of aluminum with silicon] / G.B. Stroganov, V.A. Rotenberg, G.B. Gershman. – М.: Metallurgiya, 1977. – 272 p. (In Russian).

3. **Belov, N.A.** Porshnevye siluminy [Piston silumins] / N.A. Belov, V.D. Belov, S.V. Savchenko i dr. – M: Izdatel'skii dom «Ruda i metally», 2011. – 248 p. (In Russian).
4. Modifikatsiya struktury i svoystv ehvtekticheskogo silumina ehlektronno-ionno-plazmennoi obrabotkoi [Modification of the structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma treatment] / A.P. Laskovnev, Yu.F. Ivanov, E.A. Petrikova i dr.; pod red. A.P. Laskovneva. – Minsk: Belaruskaya Navuka, 2013. – 287 p. (In Russian).
5. **Ivanov, Yu.F.** Microstructure and properties of hypoeutectic silumin treated by high-current pulsed electron beams / Yu.F. Ivanov, D.V. Zagulyaev, S.A. Nevskii, et al. // Progress in Physics of Metals. – 2019. – V. 20. – I. 3. – P. 447-484.
6. **Ivanov, Yu.** Modification of surface layer of hypoeutectic silumin by electroexplosion alloying followed by electron beam processing / Yu. Ivanov, V. Gromov, D. Zaguliaev, et al. // Materials Letters. – 2019. – V. 253. – P. 55-58. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.05.148.
7. **Ivanov, Yu.F.** Changes in surface structure and mechanical characteristics of $Al-5$ wt% Si alloy after irradiation by electron beam / Yu.F. Ivanov, D.V. Zaguliaev, A.M. Glezer, et al. // Materials Letters. – 2020. – V. 275. – Art. № 128105. – 4 p. DOI: 10.1016/j.matlet.2020.128105.
8. **Sarychev, V.** Model of nanostructure formation in $Al-Si$ alloy at electron beam treatment / V. Sarychev, S. Nevskii, S. Konovalov, A. Granovskii, Y. Ivanov, V. Gromov // Materials Research Express. – 2019. – V.6. – I. 2. – Art. № 026540. – 14 p. DOI: 10.1088/2053-1591/aaec1f.
9. Ehlektronno-ionno-plazmennaya modifikatsiya poverkhnosti tsvetnykh metallov i splavov [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).
10. **Ivanov, Yu.F.** Ustalost' silumina, modifitsirovannogo ehlektronno-puchkovoi obrabotkoi [Fatigue of silumin modified by electron beam treatment] / Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, S.V. Konovalov, K.V. Aksenova. – Novokuznetsk: Izd-vo «Poligrafist», 2016. – 184 p. (In Russian).
11. **Konovalov, S.V.** Fatigue life of silumin irradiated by high intensity pulsed electron beam / S.V. Konovalov, K.V. Alsaraeva, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, VI International Scientific Practical Conference on Innovative Technologies and Economics in Engineering, 21-23 May 2015, Yurga, Russia. – 2015. – V. 91. – Art. № 012029. – 6 p. DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012029.
12. **Konovalov, S.V.** Fatigue variation of surface properties of silumin subjected to electron-beam treatment / S.V. Konovalov, K.V. Aksenova, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, O.A. Semina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 110. – Art. № 012012. – 5 p. DOI: 10.1088/1757-899X/110/1/012012.
13. **Gromov, V.E.** Structural evolution of silumin treated with a high intensity pulse electron beam and subsequent fatigue loading up to failure / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, A.M. Glezer, S.V. Konovalov, K.V. Alsaraeva // Bulletin of the Russian Academy of Sciences-Physics. – 2015. – V. 79. – I. 9. – P. 1169-1172. DOI: 10.3103/S1062873815090087.
14. **Ponweiser, N.** New investigation of phase equilibria in the system $Al-Cu-Si$ / N. Ponweiser, K.W. Richter // Journal of Alloys and Compound. – 2012. – V. 512. – I. 1. – P. 252-263. DOI: /10.1016/j.jallcom.2011.09.076.
15. **He, C.-Y.** Experimental investigation and thermodynamic modeling of the $Al-Cu-Si$ system / C.-Y. He, Y. Du, H.-L. Chen, H. Xu // CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. – 2009. – V. 33. – I. 1. – P. 200-210. DOI: 10.1016/j.calphad.2008.07.015.

16. **Bannykh, O.A.** Diagrammy sostoyaniya dvoynykh i mnogokomponentnykh sistem na osnove zheleza: Spravochnik [State diagrams of binary and multicomponent systems based on iron: A Handbook] / O.A. Bannykh, P.B. Budberg, S.P. Alisova i dr.; pod red. O.A. Bannykh, M.E. Dritsa. – M.: Metallurgiya, 1986. – 440 p. (In Russian).
17. **Kalmykov, K.B.** Phase equilibria in the system $Al-Cu-Si$ at a temperature of 853 K in the aluminum enriched region / K.B. Kalmykov, N.L. Zvereva, S.F. Dunaev, et. al. // Moscow University Chemistry Bulletin. – 2009. – V. 64. – I. 2. – P. 99-103. DOI: 10.3103/S0027131409020060.
18. **Zhang, L.M.** Phase diagram of the $Al-Cu-Fe$ quasicrystal-forming alloy system. III. Isothermal sections / L.M. Zhang, R. Lück // International Journal of Materials Research. – 2003. – V. 94. – I. 2. – P. 108-115. DOI: 10.3139/146.030108.
19. **Du, Y.** A thermodynamic description of the $Al-Fe-Si$ system over the whole composition and temperature ranges via a hybrid approach of CALPHAD and key experiments / Y. Du, J.C. Schuster, Z.-K. Liu, et. al. // Intermetallics. – 2008. – V.16. – I. 4. – P. 554-570. DOI: 10.1016/j.intermet.2008.01.003.
20. **Dons, A.L.** $AlFeSi$ -particles in commercial pure aluminum / A.L. Dons // Zeitschrift für Metallkunde. – 1984. – V. 75. – I. 2. – P. 170-174.
21. **Miyazaki, T.** Phase decomposition of $Fe-Si-Al$ ordered alloys / T. Miyazaki, T. Kozakai, T. Tsuzuki // Journal of Materials Science. – 1986. – V. 21. – I. 7. – P. 2557-2564. DOI: 10.1007/BF01114307.
22. **Wang, C.P.** Phase equilibria in $Fe-Cu-X$ ($X:Co,Cr,Si,V$) ternary systems / C.P. Wang, X.J. Liu, I. Ohnuma, et. al. // Journal of Phase Equilibria. – 2002. – V. 23. – № 3. – P. 236-245. DOI: 10.1361/105497102770331712.
23. **Klopotov, A.A.** Strukturno-fazovye sostoyaniya poverkhnostnogo sloya splava $Al-Si$ posle ehlektronno-ionno-plazmennoi obrabotki [Structural-phase state of the surface layer of $Al-Si$ alloy after electron-ion-plasma treatment] / A.A. Klopotov, Yu.F. Ivanov, E.A. Petrikova i dr. // Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials. – 2014. – I. 6. – P. 162-170. (In Russian).

Original paper

STRUCTURAL-PHASE STATE OF SILUMIN OF HYPEREUTECTIC COMPOSITION IRRADIATED BY A PULSED ELECTRON BEAM

Yu.F. Ivanov¹, A.A. Klopotov², E.A. Petrikova¹, M.E. Rygina^{1,3}, O.S. Tolkachev¹, V.D. Klopotov³

¹*Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia*

²*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

³*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.089

Abstract: Silumin (an alloy of aluminum with silicon) is a cheap industrial alloy with good corrosion resistance, high specific mechanical properties and good casting properties. As a result it has found wide applications in modern industry (aircraft and mechanical engineering, instrument making, shipbuilding, etc.). The aim of this work is to analyze the regularities of transformation of the structure and phase composition of the surface layer of a hypereutectic silumin ($Al-22$ wt % Si), subjected to irradiation with an intense pulsed electron beam. It was found that irradiation of silumin with a pulsed electron beam (18 keV, 25 J / cm², 200 μs, 3 pulses, 0,3 s⁻¹) leads to melting of the surface layer up to 60 μm thick, the high-speed crystallization of which is accompanied by the formation of a submicro-nanocrystalline multiphase structure. It is shown that aluminum (a solid solution based on

fcc crystal lattice) forms cells of high-speed crystallization; nanoscale particles of the second phases are located at the cell boundaries. Analysis of three-component state diagrams of the $Al-Si-Fe-Cu$ system (the main elements of the studied silumin) demonstrated the possibility of forming a large number of two- and three-element compounds in the alloy under equilibrium conditions. It has been shown by diffraction electron microscopy that, along with three-element phases, phases based on four and, possibly, more elements are formed in silumin.

Keywords: hypereutectic silumin, pulsed electron beam, elemental and phase composition, defective substructure, equilibrium diagrams.

Иванов Юрий Федорович – д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Клопотов Анатолий Анатольевич – д.ф.-м.н., профессор кафедры Прикладной механики и материаловедения ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Петрикова Елизавета Алексеевна – младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Рыгина Мария Евгеньевна – аспирант ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Толкачев Олег Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, ФГБУН «Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН»

Клопотов Владимир Дмитриевич – к.т.н., доцент кафедры математики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Yury F. Ivanov – Dr. Sc., Chief Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

Klopotov Anatoly Anatolyevich – Dr. Sc., Professor, Department of Applied mechanics and materials science, Tomsk State University of Architecture and Building

Elizaveta A. Petrikova – Junior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

Regina Maria Evgenievna – graduate student National Research Tomsk Polytechnic University, Junior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

Oleg S. Tolkachev – Junior Researcher of the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics SB RAS

Klopotov Vladimir Dmitrievich –Docent of Mathematics Department, National Research Tomsk Polytechnic University

Поступила в редакцию/received: 04.09.2020; после рецензирования/revised: 04.10.2020; принята/accepted 11.10.2020.