

Изменение периода кристаллической решетки фаз в сплавах системы Al – Si после электронно-пучковой обработки

Ю. А. ШЛЯРОВА¹, Д. В. ЗАГУЛЯЕВ¹, канд. техн. наук, Ю. Ф. ИВАНОВ², д-р физ.-мат. наук,

В. Е. ГРОМОВ¹, д-р физ.-мат. наук

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

² Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Исследован поверхностный слой сплавов Al – 5 % Si, Al – 10 % Si, Al – 20 % Si после обработки электронным пучком с разной плотностью энергии (10, 30 и 50 Дж/см²). Методом рентгенофазового анализа определены фазовый состав поверхностного слоя и периоды кристаллических решеток фаз после облучения и в исходном состоянии. Установлено, что облучение импульсным электронным пучком Al – Si-сплавов сопровождается изменением периода кристаллической решетки фаз в поверхностном слое, что может быть связано с изменением концентрации легирующих элементов.

Ключевые слова: период кристаллической решетки; электронный пучок; алюминиевый сплав; Al – 5 % Si; Al – 10 % Si; Al – 20 % Si.

ВВЕДЕНИЕ

Обработка концентрированными потоками энергии является одним из современных и важнейших методов улучшения поверхностных свойств материалов, их элементного и фазового составов. При этом структура и свойства основного объема изделий не изменяются [1]. Среди наиболее изучаемых и широко используемых методов обработки поверхности материалов концентрированными потоками энергии можно выделить ионное [2, 3] и лазерное [4, 5] облучения, а также облучение импульсными электронными пучками [6, 7]. Среди этих методов относительно новым является обработка поверхности материала сильноточным импульсным пучком электронов [8, 9]. Такой пучок электронов, обладающий высокой энергией ($1 \cdot 10^8 - 1 \cdot 10^9$ Вт/см²), воздействует на тонкий поверхностный слой (менее десятков микрометров) за короткое время (несколько микросекунд), что позволяет проводить чрезвычайно быстрый нагрев и охлаждение поверхности. В работах различных научных организаций показано, что обработка поверхности материалов сильноточным электронным пуч-

ком вызывает образование метастабильных микроструктур, таких как пересыщенный твердый раствор [10], ультратонкие зерна [11] и наноструктуры [11, 12], что в значительной степени влияет на физические и механические характеристики готовых изделий.

В наших ранее опубликованных работах [13, 14] были исследованы структура и механические свойства силуминов после обработки концентрированными потоками энергии.

Цель настоящей работы — исследование фазового состава и периода кристаллической решетки фаз в сплавах системы Al – Si с разным содержанием кремния, подвергнутых обработке высокоинтенсивным импульсным электронным пучком с различной плотностью энергии.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали доэвтектические сплавы Al – 5 % Si, Al – 10 % Si и заэвтектический сплав Al – 20 % Si. Химический состав сплавов (результаты рентгеноспектрального анализа) приведен в таблице.

Таблица. Химический состав сплавов Al – 5 % Si, Al – 10 % Si и Al – 20 % Si

Сплав	Содержание элементов, % (масс.)									
	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Ni	Ti	Cr	Zr
Al – 5 % Si	90,50	5,39	0,64	1,330	0,65	0,240	0,170	—	—	1,08
Al – 10 % Si	84,88	11,10	0,25	2,190	0,58	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	—

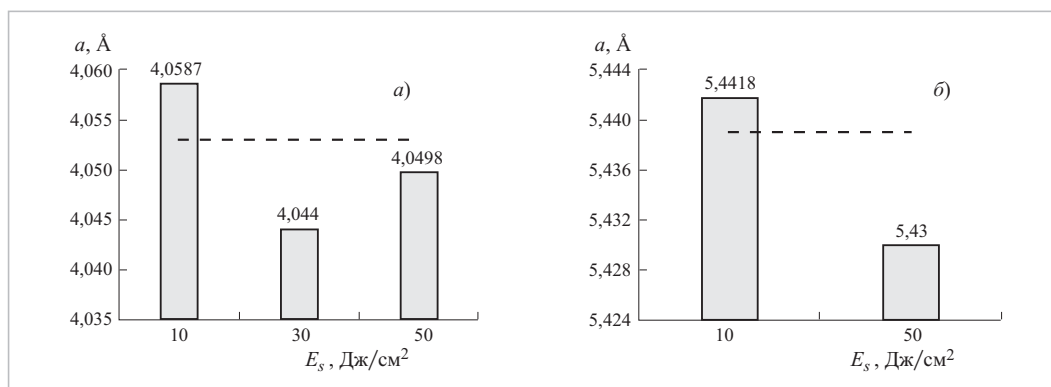


Рис. 1. Зависимость периода кристаллической решетки α_{Al} -фазы (а) и Si-фазы (б) в поверхностном слое сплава Al – 5 % Si от плотности энергии пучка электронов при ЭПО (штриховой линией показано значение периода решетки фазы в сплаве в исходном состоянии)

Для исследований изготавливали прямоугольные образцы размерами $15 \times 15 \times 5$ мм. Поверхность образцов шлифовали и полировали до зеркального блеска. Затем проводили электронно-пучковую обработку (ЭПО) на лабораторной установке “СОЛО” [15]. Определяли фазовый состав поверхностного слоя образцов после ЭПО с разной плотностью высокоинтенсивного импульсного электронного пучка: $E_s = 10, 30$ и 50 Дж/см² (сплавы Al – 5 % Si и Al – 10 % Si) и $E_s = 25$ и 35 Дж/см² (сплав Al – 20 % Si). Остальные параметры электронного пучка были постоянными для всех образцов: энергия ускоренных электронов 17 кэВ; время импульса 200 мкс; количество импульсов 3; частота следования импульсов $0,3 \text{ с}^{-1}$; давление остаточного газа (аргона) в рабочей камере агрегата $2 \cdot 10^{-2}$ Па. Исследования фазового состава проводили методами рентгенофазового анализа на дифрактометре Shimadzu XRD 6000).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сплав Al – 5 % Si. Установлено, что основными фазами в исходном состоянии сплава Al – 5 % Si являются твердый раствор на основе алюминия (α_{Al} -фаза), кремний (Si-фаза), а также присутствует нитрид кремния (фаза Si_3N_4).

Облучение сплава Al – 5 % Si импульсным электронным пучком разной интенсивности сопровождается изменением периода кристаллической решетки α_{Al} -фазы. Анализ результатов, представленных на рис. 1, а, показал, что при $E_s = 10$ Дж/см² период решетки α_{Al} -фазы сплава Al – 5 % Si достигает максимальной величины ($a = 4,0587$ Å), которая значимо выше исходной ($a = 4,0531$ Å). При $E_s = 30$ Дж/см² период решетки α_{Al} -фазы снижается до минимального значения $a = 4,044$ Å, а при $E_s = 50$ Дж/см² опять увеличивается до $a = 4,0498$ Å.

Определяли также период кристаллической решетки Si-фазы в сплаве Al – 5 % Si после ЭПО. Уста-

новлено, что после облучения при $E_s = 10$ Дж/см² Si-фаза имеет $a = 5,4418$ Å, что значительно выше исходного значения ($a = 5,4391$ Å) (рис. 1, б). При $E_s = 50$ Дж/см² период решетки Si-фазы снижается до $a = 5,430$ Å.

Сплав Al – 10 % Si. Основными фазами в сплаве Al – 10 % Si в исходном состоянии, как и в сплаве Al – 5 % Si, являются α_{Al} -фаза, кремний (Si-фаза) и фаза Si_3N_4 .

После ЭПО сплава Al – 10 % Si с разной плотностью пучка период кристаллической решетки α_{Al} -фазы изменяется. Из рис. 2, а можно видеть, что при повышении плотности пучка от 10 до 30 Дж/см² период решетки α_{Al} -фазы уменьшается от $a = 4,0481$ Å до $a = 4,0444$ Å. При $E_s = 50$ Дж/см² наблюдается его минимальное значение: $a = 4,0435$ Å, что меньше исходной величины $a = 4,0502$ Å.

После ЭПО с $E_s = 10$ и 30 Дж/см² сплава Al – 10 % Si период решетки Si-фазы $a = 5,4277$ и $5,4180$ Å соответственно, что ниже исходного значения ($a = 5,4309$ Å). При $E_s = 50$ Дж/см² период снижается до минимума ($a = 5,4039$ Å), который также меньше исходного (рис. 2, б).

Сплав Al – 20 % Si. Основные фазы сплава Al – 20 % Si в исходном состоянии — α_{Al} -фаза, Si-фаза, нитрид кремния Si_3N_4 и интерметаллид AlSi. Исследование фазового состава поверхности сплава после ЭПО с разной плотностью пучка показало (рис. 3), что при увеличении E_s от 25 до 35 Дж/см² период решетки Si-фазы незначительно уменьшается — от $a = 5,4341$ до $5,4437$ Å, но остается выше исходной величины ($a = 4,046$ Å). В отличие от этого, период решетки фазы AlSi не изменяется после ЭПО с $E_s = 25$ и 35 Дж/см².

Можно предположить, что причиной изменения периода кристаллической решетки фаз в сплавах Al – 5 % Si и Al – 10 % Si после ЭПО является изменение концентрации легирующих элементов в них. Из ана-

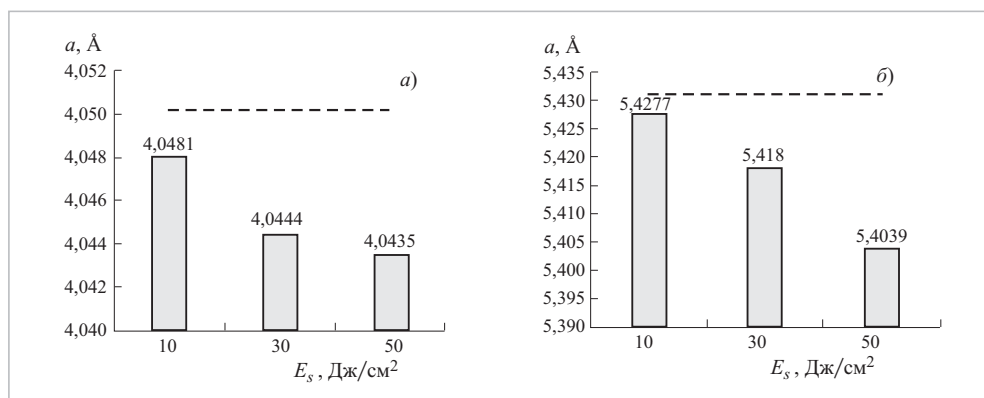


Рис. 2. Зависимость периода кристаллической решетки α_{Al} -фазы (а) и Si-фазы (б) в поверхностном слое сплава Al – 10 % Si от плотности энергии пучка электронов при ЭПО (штриховой линией показано значение периода решетки фазы в сплаве в исходном состоянии)

лиза данных [16] следует, что у кремния, меди, никеля, железа и марганца радиусы атомов меньше, а у магния — больше, чем у алюминия. Зависимость периода кристаллической решетки алюминия от длительности импульсов и плотности энергии пучка электронов будет определяться процессами растворения и повторного выделения частиц кремния и интерметаллидов, происходящих при облучении материала импульсным электронным пучком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализа фазового состава модифицированного электронным пучком поверхностного слоя сплавов Al – 5 % Si, Al – 10 % Si, Al – 20 % Si, а также исследована зависимость периода кристаллической решетки фаз от плотности энергии пучка электронов. Показано, что облучение сплавов Al – 5 % Si и Al – 10 % Si импульсным электронным пучком сопровождается изменением периода кристал-

лической решетки основных фаз — твердого раствора на основе алюминия (α_{Al} -фазы) и кремния (Si-фазы). Максимальный период решетки этих фаз достигается при плотности энергии пучка $E_s = 10$ Дж/см². Увеличение плотности энергии пучка до 30 Дж/см² (сплав Al – 5 % Si) и 50 Дж/см² (сплав Al – 10 % Si) вызывает снижение периода решетки фаз до минимума.

Облучение сплава Al – 20 % Si импульсным электронным пучком сопровождается изменением периода кристаллической решетки фаз AlSi и Si. Период кристаллической решетки Si-фазы при плотности энергии пучка электронов 25 и 35 Дж/см² составляет 5,4341 и 5,4437 Å соответственно, что выше его исходного значения (4,046 Å). Период кристаллической решетки фазы AlSi не изменяется при облучении с плотностью пучка как 25 Дж/см², так и 35 Дж/см².

Можно предположить, что причиной изменения периода кристаллической решетки в алюминиевых сплавах является изменение концентрации легирующих элементов в фазах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Poate J. M., Foti G., Jacobson D. C. Surface Modification and Alloying by Laser, Ion, and Electron Beams. Berlin: Springer, 2013. P. 8385 – 78404.
2. Abreu C. M., Cristóbal M. J., Figueroa R. et al. Evolution of corrosion behavior for AA7075 aluminum alloy implanted with nitrogen // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Inter-actions with Materials and Atoms. 2019. V. 442. P. 1 – 12.
3. Gushchina N. V., Ovchinnikov V. V., Mozharovsky S. M., Kaigorodova L. I. Restoration of plasticity of cold-deformed aluminum alloy by short-term irradiation with accelerated Ar⁺ ions // Surface and Coatings Technology. 2020. V. 389. P. 125504.
4. Otani Y., Sasaki S. Effects of the addition of silicon to 7075 aluminum alloy on microstructure, mechanical properties, and selective laser melting processability // Materials Science and Engineering A. 2020. V. 777. P. 139079.
5. Lei S., Yang G., Wang X. et al. High energy femtosecond laser peening of 2024 aluminum alloy // Procedia CIRP. 2018. V. 74. P. 357 – 361.

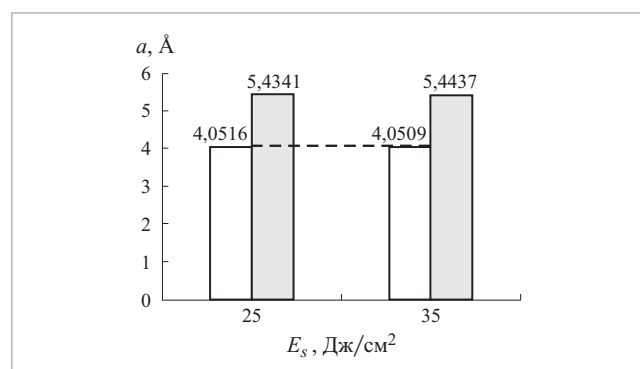


Рис. 3. Зависимость периода кристаллической решетки AlSi-фазы (светлые столбики) и Si-фазы (темные столбики) в поверхностном слое сплава Al – 20 % Si от плотности энергии пучка электронов при ЭПО (штриховой линией показано значение периода решетки фазы в сплаве в исходном состоянии)

6. Cai J., Guan Q., Lv P. et al. Crater formation on the surface of pure metal and alloy irradiated by high current pulsed electron beam // High Temp. Mater. Process. 2018. V. 37. P. 777 – 784.
7. Cai J., Ji L., Yang S. et al. Deformation mechanism and microstructures on polycrystalline aluminum induced by high-current pulsed electron beam // Chin. Sci. Bull. 2013. V. 58. P. 2507 – 2511.
8. Qin Y., Dong C., Song Z. F. et al. Deep Modification of materials by thermal stress wave generated by irradiation of high-current pulsed electron beams // J. Vac. Sci. Technol. A. 2009. V. 27. P. 430 – 435.
9. Cai J., Guan Q. F., Hou X. L. et al. Isothermal oxidation behaviour of thermal barrier coatings with CoCrAlY bond coat irradiated by high-current pulsed electron beam // Appl. Surf. Sci. 2014. V. 317. P. 360 – 369.
10. Han Z. Y., Ji L., Cai J. et al. Surface nanocrystallization of 3Cr13 stainless steel induced by high-current pulsed electron beam irradiation // J. Nanomater. 2013. V. 603586.
11. Cai J., Yang S. Z., Ji L. et al. Surface microstructure and high temperature oxidation resistance of thermal sprayed CoCrAlY coating irradiated by high current pulsed electron beam // Surf. Coat. Technol. 2014. V. 251. P. 217 – 225.
12. Guan Q. F., Yang P. L., Zou H., Zou G. T. Nanocrystalline and amorphous surface structure of 0.45 % C steel produced by high current pulsed electron beam // J. Mater. Sci. 2006. V. 41. P. 479 – 483.
13. Zaguliaev D., Gromov V., Rubannikova Yu. et al. Structure and phase states modification of Al – 11Si – 2Cu alloy processed by ion-plasma jet and pulsed electron beam // Surface and Coatings Technology. 2020. V. 383. P. 125246.
14. Ivanov Yu. F., Gromov V. E., Zagulyaev D. V. et al. Nanostructure formation of hypoeutectic silumin by electron-ion-plasma methods // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1393. P. 012091.
15. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / Под ред. Н. Н. Ковалёва и Ю. Ф. Иванова. Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 304 с.
16. Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др. Физические величины: Справочник / Под общ. ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

Статья поступила в редакцию 25.01.2022 г.

Changes in the lattice constants of phases in Al – Si alloys after electron beam treatment

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

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

The surface layers of alloys Al – 5% Si, Al – 10% Si and Al – 20% Si after electron beam treatment with different energy densities (10, 30 and 50 J/m²) are studied. X-ray diffraction phase analysis is used to determine the phase composition of the surface layer and the lattice constants of the phases after irradiation and in the initial condition. It is shown that the irradiation of the Al – Si alloys with an electron beam is accompanied by changes in the lattice constants of the phases in the surface layer, which may be associated to changes in the concentration of the alloying elements.

Keywords: crystal lattice constant, electron beam, aluminum alloy; Al – 5% Si, Al – 10% Si, Al – 20% Si.