

СТРУКТУРА ЗАЭВТЕКТИЧЕСКОГО СИЛУМИНА Al-20Si, ЛЕГИРОВАННОГО АТОМАМИ ХРОМА И НИКЕЛЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

В.И. Шиманский¹⁾, А. Евдокимовс¹⁾, М.В. Яцко¹⁾, В.М. Асташинский²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,

пр. Независимости 4, 220030 Минск, Беларусь, shymanskiv@mail.ru

²⁾Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки 15, 220072 Минск, Беларусь

В представленной работе изучена структура и фазовый состав заэвтектического силуминового сплава (с содержанием кремния 20 ат. %), легированного атомами никеля и хрома при воздействии компрессионными плазменными потоками. Легирование приповерхностного слоя осуществлялось путем предварительного нанесения соответствующего металлического покрытия толщиной 1-2 мкм с последующим воздействием компрессионными плазменными потоками с плотностью поглощенной энергии, обеспечивающей плавление приповерхностного слоя. В результате жидкофазного перемешивания расплава происходит ряд химических реакций, приводящих к образованию силицида Ni_2Si и интерметаллида Al_3Ni в случае легирования никелем, и сложного силицида $Al_{13}Cr_4Si_4$ при легировании хромом. При последующем термическом отжиге при температуре 500 °С происходит распад силицида Ni_2Si .

Ключевые слова: заэвтектический силуминовый сплав; компрессионные плазменные потоки; силициды, интерметаллиды, термическая стабильность.

STRUCTURE OF HYPEREUTECTIC SILUMIN Al-20Si ALLOYED WITH CHROMIUM AND NICKEL ATOMS BY COMPRESSION PLASMA FLOW IMPACT

V.I. Shymanski¹⁾, A. Jevdokimovs¹⁾, M.V. Yatsko¹⁾, V.M. Astashynski²⁾

¹⁾Belarusian State University,

4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, shymanskiv@mail.ru

²⁾A.V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
15 P. Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus

In this work, the structure and phase composition of a hypereutectic silumin alloy (with a silicon content of 20 at. %) alloyed with nickel and chromium atoms under the action of compression plasma flows are studied. Alloying of the near-surface layer was carried out by preliminary deposition of a corresponding metal coating with a thickness of 1-2 μm followed by exposure to compression plasma flows with a density of absorbed energy providing melting of the near-surface layer. As a result of liquid-phase mixing of the melt, a number of chemical reactions take place leading to the formation of the silicide Ni_2Si and the intermetallic compound Al_3Ni in the case of alloying with nickel, and the complex silicide $Al_{13}Cr_4Si_4$ when alloying with chromium atoms. Upon subsequent thermal annealing at a temperature of 500 °C, Ni_2Si silicide decomposes.

Keywords: hypereutectic silumin alloy; compression plasma flows; silicides, intermetallics, thermal stability.

Введение

Сплавы на основе алюминия и кремния с высоким (выше 13 %) содержанием кремния, относящиеся к классу заэвтектических сплавов, и обладающих повышенной твердостью и износостойкостью, представляют особый интерес для машиностроения [1]. Силумины являются дешевыми легкими сплавами, обладающими

хорошей коррозионной стойкостью и литейными свойствами, малым удельным весом. Однако повышение в сплаве концентрации кремния свыше эвтектической концентрации сопровождается увеличением газонасыщения материала, что приводит к росту количества и размеров пор, достигающих нескольких десятков микрон, 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 недостатки силуминов заэвтектического состава существенным образом сужают сферу его применения в промышленности. Помимо всего прочего силуминовые сплавы имеют ограниченную температурную область практического применения вследствие низкой температуры плавления основного компонента (алюминия), что не позволяет эффективно использовать такие сплавы при температурах выше 600 °С.

Одним из способов повышения термической стабильности заэвтектических силуминовых сплавов может являться формирование в его приповерхностном слое высокотемпературных соединений, например, силицидов или интерметаллидов. Присутствие таких соединений именно в приповерхностном слое позволит «экранировать» основной объем сплава от действия высоких температур.

Основной целью данной работы являлось установление основных закономерностей структурно-фазовых превращений в заэвтектическом силуминовом сплаве при его легировании атомами хрома, циркония, никеля при воздействии компрессионными плазменными потоками (КПП). Как показали ранние исследования, воздействие КПП на заэвтектические силуминовые сплавы позволяет достичь диспергирования кремниевой составляющей, повысив прочностные свойства всего модифицированного приповерхностного слоя.

Объект и методика эксперимента

В качестве объектов исследования использовались образцы заэвтектического силуминового сплава в виде пластин диаметром 28 мм и толщиной 2 мм. На поверхность пластин были нанесены тонкие покрытия хрома и циркония путем ваку-

умно-дугового распыления, а также покрытие никеля методом гальванического осаждения. Толщина всех покрытий составляла 2-3 мкм. Образцы обрабатывались потоками компрессионной плазмы, генерируемыми магнитоплазменным компрессором компактной геометрии в остаточной атмосфере азота при давлении 10 торр (3.0 кПа) [2]. Длительность импульса воздействия плазменного потока составляло 100 мкс. Обработка происходила при напряжении на системе конденсаторов 4,0 кВ при изменении расстояния между поверхностью обрабатываемого образца и срезом электродов в магнитоплазменном компрессоре от 14 до 8 см. Это позволило варьировать плотность энергии, поглощаемую образцом заэвтектического силуминового сплава от 26 до 45 Дж/см². Воздействие КПП осуществлялось тремя последовательными импульсами, следующими друг за другом с интервалом времени 20 с, что позволяло формировать однородные по структурно-фазовому состоянию приповерхностные слои. Впоследствии модифицированные образцы подвергались изотермическому отжигу в воздушной атмосфере при температуре 500 °С, время отжига достигало 6 часов.

В работе исследовался фазовый состав модифицированных слоев с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Ultima IV Rigaku в геометрии параллельных пучков с использованием медного излучения (длина волны 0.154178 нм). Элементный состав образцов определялся методом рентгеноспектрального микроанализа на установке Oxford MaxN, работающего совместно с растровым электронным микроскопом (РЭМ) LEO 1455 VP, с помощью которого также анализировалась микроструктура поперечных шлифов.

Результаты и их обсуждение

Анализ морфологии поверхности заэвтектического силумина с покрытием никеля показал наличие плавления после воздействия КПП с выбранными энерге-

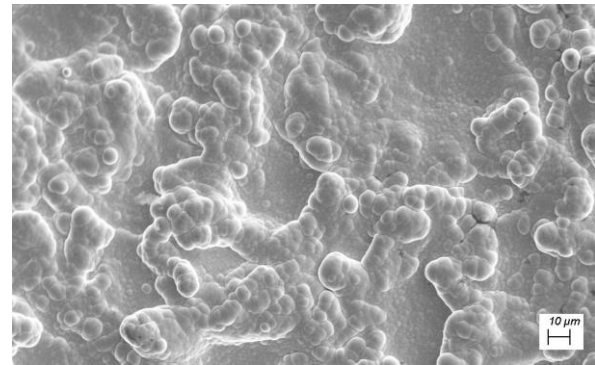
тическими параметрами. Действительно, на изображении поверхности. Полученном с помощью растровой электронной микроскопии, (рис. 1а) можно заметить глобулярную структуру, характерную для покрытий, формируемых с помощью гальванического осаждения. Видно, что покрытие характеризуется наличием отдельных зерен по форме близко к сферической, размер которых составляет несколько мкм. Неравномерный характер их распределения по поверхности может быть обусловлен рельефом исходной поверхности.

После воздействия КПП на поверхности наблюдается волнообразный рельеф, сформированный за счет действия капиллярных сил при растекании расплавленной фазы приповерхностного слоя (рис. 1б). Более детальное изучение поверхности в режиме регистрации отраженных электронов показало, что на поверхности существуют чередующиеся области неправильной формы различного элементного состава (рис. 1в).

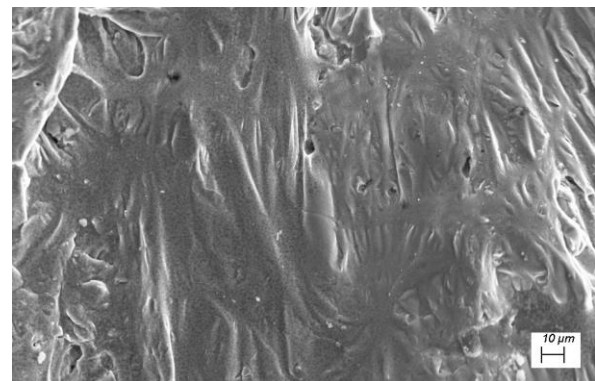
Подобная структура обычно характерна для эвтектической смеси двух различных фаз. Так, согласно результатам рентгеноспектрального микроанализа установлено, что в светлых участках преимущественно присутствует алюминий и никель, в то время как темные участки обеднены никелем, но в них можно заметить более высокую концентрацию кремния (рис. 2).

Рентгеноструктурный анализ позволил установить фазовый состав модифицированного слоя (рис. 3). На участке рентгеновской дифрактограммы обнаружены дифракционные линии алюминия и кремния, которые также присутствовали на дифрактограммах исходного состояния силуминового сплава. Помимо основных составляющих сплава, зафиксированы дифракционные линии силицида никеля Ni_2Si и интерметаллида Al_3Ni .

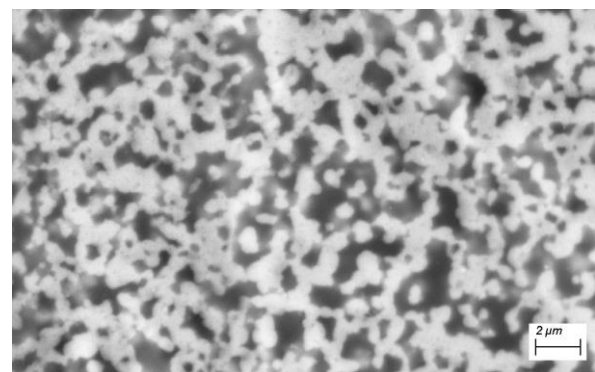
Вследствие того, что в данной работе использовался заэвтектический силуминовый сплав, в нем содержится избыточ-



а(а)



б(б)



в(в)

Рис. 1. РЭМ-изображения поверхности сплава Al-Si-Ni в исходном состоянии (а), после воздействия КПП (б, в)

Fig. 1. SEM-images of the Al-Si-Ni alloy in the initial state (a) and after CPF impact (b, c)

ное по сравнению с эвтектической концентрацией содержание кремния. В результате плавления приповерхностного слоя силуминового сплава и покрытия никеля происходит перемешивание всех элементов в жидкофазном режиме, в результате чего избыток кремния вступает в химическую реакцию с никелем, образуя силицид Ni_2Si . Помимо этого, часть атомов никеля участвует в реакции, приво-

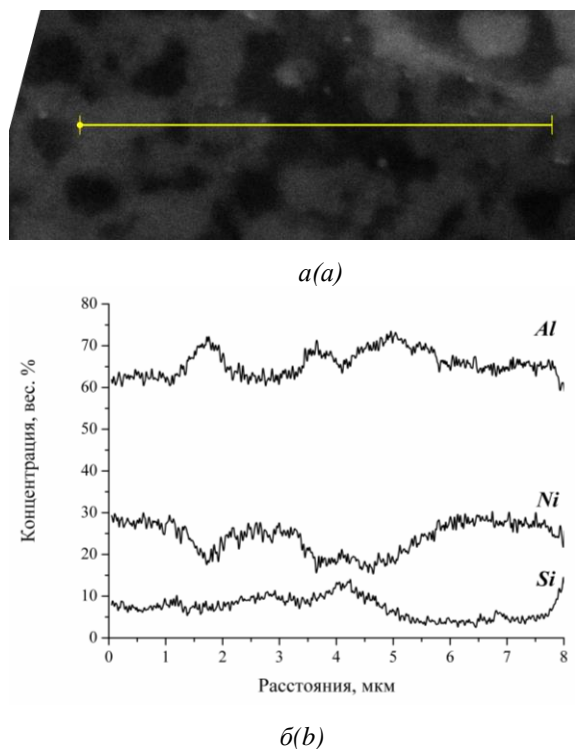


Рис. 2. РЭМ-изображение выделенного участка поверхности сплава Al-Si-Ni после воздействия КПП (а) и распределение элементов вдоль выделенного направления (б)

Fig. 2. SEM-image of the Al-Si-Ni alloy after CPF impact (a) and elements distribution along the defined line (b)

дующей к формированию интерметаллидного соединения Al_3Ni , которое обогащено алюминием ввиду его большей концентрации в расплаве.

Сопоставляя полученные данные о фазовом составе с результатами пространственного распределения элементов, можно заключить, что обнаруженные светлые области на поверхности преимущественно включают в себя интерметаллид Al_3Ni , в то время как темные области соответствуют силицидной фазе.

В последствие модифицированные заэвтектические силуминовые сплавы подвергались изотермическому отжигу в воздушной атмосфере при температуре близкой к температуре плавления эвтектики Al-Si (500 °C), время отжига достигало 6 часов. Однако уже после 2 часов отжига заметны изменения фазового состава в приповерхностном слое.

Действительно, результаты рентгено-

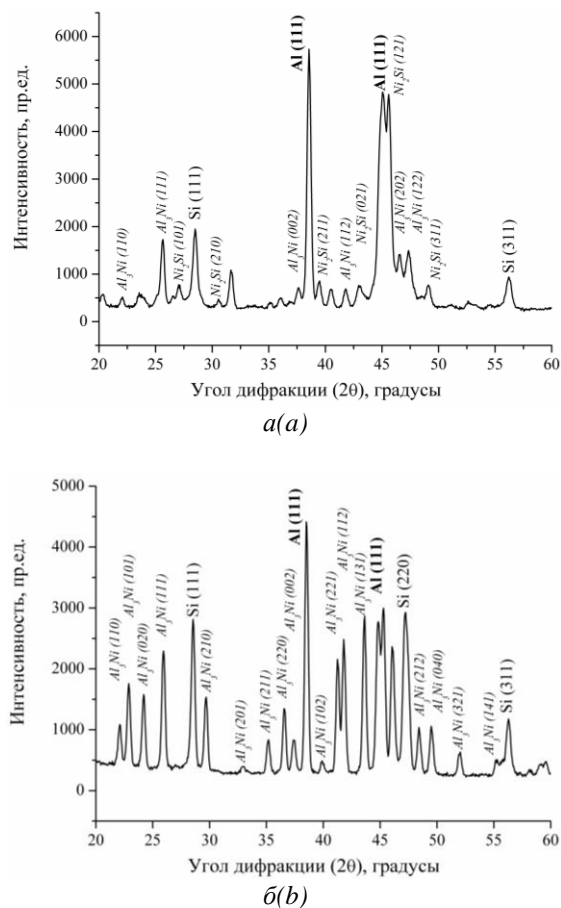


Рис. 3. Участок рентгеновской дифрактограммы сплава Al-Si-Ni после воздействия КПП (а) после отжига при температуре 500 °C (б)

Fig. 3. XRD pattern of the Al-Si-Ni alloy after CPF impact (a) and air annealing at 500 °C (b)

структурного анализа показывают наличие лишь исходных фаз – алюминия и кремния, а также интерметаллида Al_3Ni . Силицидная фаза при этом не обнаруживается. Можно предположить, что вследствие длительного теплового нагрева происходит распад силицида Ni_2Si , при котором избыток кремния растворяется в Al-Si эвтектике. Несмотря, на достаточно высокую температуру отжига, оксидных фаз на поверхности не обнаружено.

Принципиально другая ситуация наблюдается при легировании заэвтектического силумина атомами хрома. Также, как и в случае сплава $AlSiNi$, легирование силумина атомами хрома осуществлялось воздействием КПП с энергетическими параметрами, обеспечивающими плавление приповерхностного слоя и покрытия хрома с последующим жидкофазным пере-

мешиванием. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа (рис. 4) в приповерхностном слое помимо фаз кремния и алюминия обнаружены дифракционные линии, соответствующие сложному силициду $\text{Al}_{13}\text{Cr}_4\text{Si}_4$.

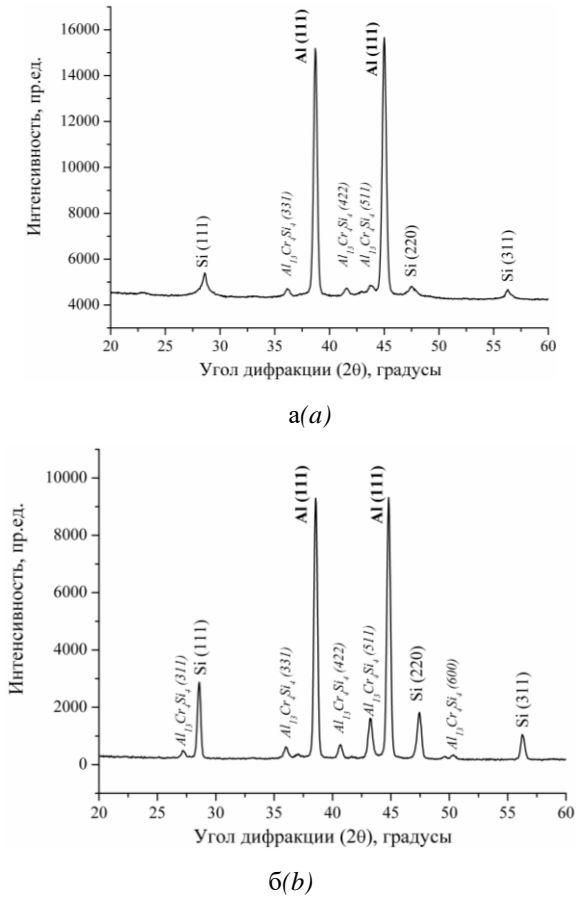


Рис. 4. Участок рентгеновской дифрактограммы сплава Al-Si-Cr после воздействия КПП (а) после отжига при температуре 500 °С (б)
Fig. 4. XRD pattern of the Al-Si-Cr alloy after CPF impact (a) and air annealing at 500 °C (b)

В данном случае двойных силицидов и интерметаллидов не формируется.

После изотермического отжига силицид $\text{Al}_{13}\text{Cr}_4\text{Si}_4$ проявляет стабильность, и напротив, интенсивность дифракционных линий увеличивается, что косвенно указывает на повышение его объемной доли в анализируемом слое.

Заключение

Таким образом, в работе показана принципиальная возможность формирования высокотемпературных фаз на основе силицидов переходных металлов и интерметаллидов в поверхностном слое заэвтектического силумина при воздействии компрессионными плазменными потоками. Обнаружено, что легирование заэвтектического силумина атомами никеля и хрома приводит к формированию Ni_2Si , Al_3Ni , $\text{Al}_{13}\text{Cr}_4\text{Si}_4$, которые повышают термическую стабильность приповерхностного модифицированного слоя.

Библиографические ссылки/ References

1. Jeon J.H., Shin J.H., Bae D.H. Si phase modification on the elevated temperature mechanical properties of Al-Si hypereutectic alloys. *Materials Science and Engineering A* 2019; 748: 367-370.
2. Anishchik V.M., Uglov V.V., Astashynski V.V., Astashynski V.M., Ananin S.I., Kostyukevich E.A. et al. Compression plasma flows interaction with steel surface: structure and mechanical properties of modified layer. *Vacuum* 2003; 70: 269-274.