

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ СПЛАВА Al-4 ВЕС. % Cu

С.И. Жукова, Н.И. Поляк

Белорусский государственный университет, пр. Ф. Скорины, 4, 220050, Минск
тел.: +375 17-209-54-80, e-mail: poliak@bsu.by

Исследовано влияние имплантации ионов Kr^+ с энергией 245 МэВ на структурно-фазовое состояние сплава Al-4% Cu. Показано, что в результате имплантации 10^{13} и 10^{14} Kr^+/cm^2 происходит уменьшение плотности включений θ -фазы и изменение их размеров. Наблюдаемое упрочнение сплава при имплантации является следствием обогащения твердого раствора атомами меди и радиационно-стимулированных процессов старения.

Введение

В предыдущих работах [1-5] исследовано влияние высокоэнергетической ионной имплантации (ВЭИИ) на структуру и свойства многокомпонентных дисперсионотвердеющих сплавов на основе алюминия (системы Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mg-Si, Al-Cu-Zn). Показано, что определяющую роль в изменении прочностных свойств имплантированных на разных стадиях старения сплавов играет их исходное структурно-фазовое состояние. При имплантации происходит растворение полностью либо частично когерентных включений, что приводит к снижению прочностных характеристик сплавов. Одновременно инициируются процессы старения с образованием новых зон Гинье-Престона и мелкодисперсных метастабильных включений вторых фаз, при этом степень разупрочнения уменьшается, и для повреждающих доз $\sim 10^3$ с.н.а. наблюдается упрочнение сплавов. ВЭИИ вызывает упрочняющий эффект в сплавах, фазовый состав которых включает наряду с метастабильными выделениями и стабильные.

В данной работе исследовался двухкомпонентный модельный дисперсионотвердеющий сплав Al-4 вес. % Cu, имплантированный в равновесном состоянии ионами криптона с энергией 245 МэВ.

Методика эксперимента

Для создания равновесного состояния образцы сплава Al-4 вес. % Cu (размер $10 \times 3 \times 1,5$ мм³) после закалки от $T=813$ К отжигались в течение 8 часов при $T=800$ К. После отжига образцы подвергались электрополировке (состав электролита: 49 мл $CH_3OH + 49$ мл $HNO_3 + 2$ мл HCl). Имплантация ионов криптона с энергией 245 МэВ до доз 10^{13} и 10^{14} cm^{-2} осуществлялась при температуре, не превышающей 300 К.

Нагрузка на индентор при измерении микротвердости по методу Виккерса составляла 0,1...0,4 Н, что соответствует интервалу глубин индентирования 2...6 мкм. Анализ изменения микротвердости проводился с учетом масштабного фактора.

Согласно расчету по программе TRIM, проективный пробег ионов Kr^+ в алюминиевой матрице составляет 28 мкм в приповерхностных слоях

потери энергии ионов в упругих взаимодействиях с атомами мишени $dE/dx)_n = 4,2$ эВ/нм-ион, в неупругих $-(dE/dx)_e = 11$ эВ/нм-ион.

Для исследования структуры и элементного состава сплавов использовался растровый электронный микроскоп LEO 1565VP и энергодисперсионный рентгеновский анализатор RONTES. Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре ДРОН-3 в медном излучении.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исходное структурно-фазовое состояние сплавов (рис. 1, а) соответствует наличию стабильной θ -фазы ($CuAl_2$) в виде сферических выделений со средним размером поперечника $d \sim 1$ мкм и пластинчатых ($d \sim 4 \dots 7$ мкм). Согласно [6-8],

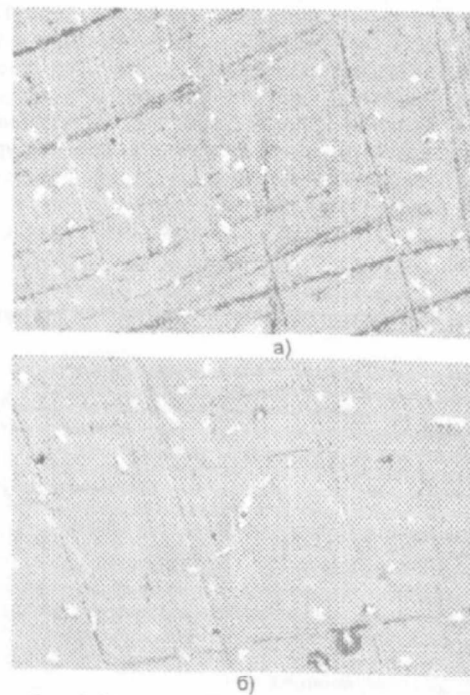


Рис. 1. Микроструктура сплава Al-4 вес. % Cu (а – неимплантированный, б – 10^{14} Kr^+/cm^2)

образование θ -фазы возможно как независимо из α -твердого раствора, так и ее рост рядом с θ' -фазой $\{ (001)_{\alpha} \} \parallel (001)_{\theta'}$ или внутри нее. Вероятно, что равновесные включения, имеющие сфериче-

скую форму, выделились непосредственно из α -твердого раствора ($\alpha \rightarrow \theta$), а пластинчатые образовались путем перехода $\alpha \rightarrow \theta' \rightarrow \theta$ (включения θ' -фазы могли появиться в процессе достижения закаленными образцами температуры отжига, поскольку образцы массивные, а распад пересыщенного твердого раствора происходит интенсивно даже при комнатной температуре). Наличие θ -фазы в отожженных образцах подтверждают и результаты фазового рентгеноанализа (рис. 2, а).

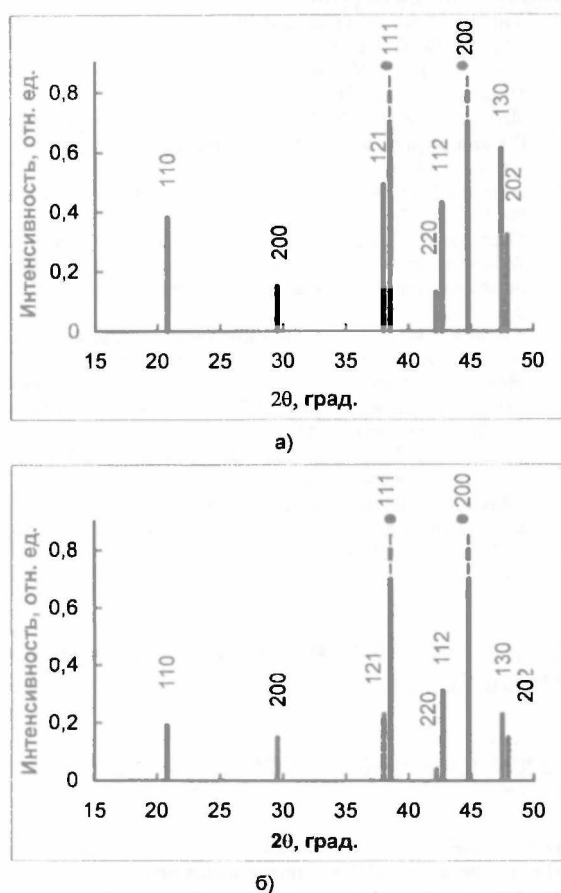


Рис. 2. Штрих-рентгенограммы сплава Al-4 вес. % Cu до (а) и после имплантации 10^{14} Kг/см^2 (б) (● - Al, остальное - CuAl₂)

При имплантации происходит частичное растворение θ -фазы, которое является результатом динамических перестроек при попадании каскада соударений в выделение [9, 10]. Как следует из рис. 1, б и данных, приведенных в таблице, суммарная плотность и объемная доля выделений с ростом дозы имплантации уменьшается. О растворении выделений свидетельствует и уменьшение интенсивности дифракционных линий θ -фазы в имплантированных образцах сплавов (рис. 2, б). Кроме того, данные рентгеноспектрального микроанализа показали, что концентрация меди в матрице сплавов повышается с ростом дозы имплантации.

Одновременно с растворением θ -фазы происходит и ее рост. На рис. 3 представлено распределение по размерам пластинчатых включений

Таблица
Относительное изменение микротвердости ($\Delta H/H|_{\Delta H=5 \text{ мкм}}$, %), суммарная плотность (ΣN_V , см^{-3}) и объемная доля (ΣV_V , %) включений CuAl₂ в сплаве Al-4%Cu

Доза	неимпл.	10^{13} Kг/см^2	10^{14} Kг/см^2
$\Delta H/H _{\Delta H=5 \text{ мкм}}$	—	1,07	1,26
ΣN_V	$2,2 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$
ΣV_V	4,0	3,8	3,4

θ -фазы. В имплантированных образцах повышается относительный вклад выделений больших размеров, появляются включения с $d \sim 7-9 \text{ мкм}$.

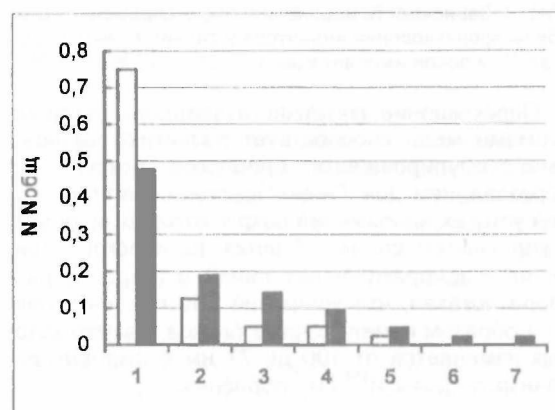


Рис. 3. Гистограмма распределения пластинчатых включений θ -фазы по размерам: 1 – 1,5-2,5; 2 – 2,5-3,5; 3 – 3,5-4,5; 4 – 4,5-5,5; 5 – 5,5-6,5; 6 – 6,5-7,5; 7 – 7,5-8,5 мкм. □ - исходное состояние, ■ - после имплантации 10^{14} Kг/см^2 .

В термических условиях такой эффект обусловлен «выравнивающей» диффузией, когда в матричном растворе существует градиент концентраций легирующего элемента между выделениями разного размера. При ВЭИИ для доз 10^{13} и 10^{14} Kг/см^2 в анализируемых приповерхностных слоях алюминия генерируется количество дефектов, которое соответствует равновесному при $T \sim 500 \text{ K}$. Высокая концентрация радиационных дефектов и высокий уровень неупругих потерь энергии ионов способствуют интенсификации диффузионных процессов, что обуславливает наблюдаемое изменение размеров θ -фазы.

Как следует из дозовой зависимости микротвердости (рис. 4), ВЭИИ вызывает упрочнение сплава, причем с ростом дозы имплантации относительное изменение микротвердости увеличивается (табл.), причем при 10^{14} Kг/см^2 этот эффект более значителен.

Растворение θ -фазы, приводящее к пересыщению твердого α -раствора атомами меди, и рост включений являются конкурирующими процессами, ответственными за изменение прочностных свойств сплавов: первый приводит к их упрочнению, второй - к разупрочнению. При используемых нами режимах имплантации преобладает эффект растворения второй фазы.

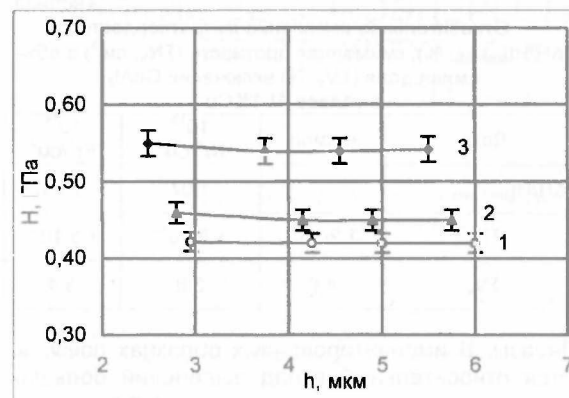


Рис. 4. Зависимость изменения микротвердости от глубины проникновения индентора в сплав Al-4 вес. % Cu до (1) и после имплантации 10^{13} (2) и 10^{14} Kr/cm^2 (3)

Пересыщение матричного твердого раствора атомами меди способствует развитию радиационно-стимулированных процессов старения с образованием зон Гинье-Престона, наличие полей упругих напряжений вокруг которых приводит к упрочнению сплава. Анализ физического уширения β дифракционных линий α -твердого раствора показал, что уширение обусловлено главным образом измельчением блоков, размер которых изменяется от 100 до 77 нм в имплантированных до дозы 10^{14} cm^{-2} образцах.

Заключение

При имплантации ионов криптона с энергией 245 МэВ до доз 10^{13} и 10^{14} cm^{-2} в сплав Al-4 вес. % Cu с включениями равновесной θ -фазы наблюдается частичное растворение включений (уменьшение плотности и объемной доли включений), что приводит к пересыщению матричного твердого раствора атомами меди. Радиационно-стимулированные процессы старения обуславливают упрочнение сплава.

Список литературы

1. Анищик В.М., Жукова С.И. Васильева Л.А. // ФХОМ. - 1998. - № 6. - С. 9.
2. Анищик В.М., Жукова С.И. Поляк Н.И. // ФХОМ. - 1999. - № 6. - С. 9.
3. Anishchik V.M., Zhukova S.I., Didyk A.Yu. et al. // Plasma physics and plasma technology. Minsk. - 2000. - V II. - P. 413.
4. Анищик В.М., Жукова С.И. В. и др. // ФХОМ. - 2001. - № 5. - С. 37.
5. Поляк Н.И. // Вестник БГУ. - 2003. - № 2. - С. 100.
6. Мондольфо Л.Ф. / Структура и свойства алюминиевых сплавов. Москва: Металлургия, 1979. - 639 с.
7. Беляев А.И. и др. / Металловедение алюминия и его сплавов. Москва: Металлургия, 1983. - 280 с.
8. Новые электронномикроскопические исследования / Под ред. Бернштейна М.П. и Скакова Ю.А. Москва: Металлургия, 1961. - 216 с.
9. Сагарадзе В.В., Колосков В.М., Шабашов А.В. и др. // Письма в ЖТФ. - 2001. - № 6. - С. 26.
10. Ибрагимов Ш.Ш., Кирсанов В.В. / В кн.: Реакторное материаловедение. Москва: ЦНИИатоминформ, 1978. - Т. 1. - 340 с.

THE EFFECT OF HIGH ENERGY ION IMPLANTATION ON THE STRUCTURAL-PHASE STABILITY OF Al-4 wt.% Cu ALLOY

S.I. Zhukova, N.I. Polyak

The Belarussian State University, Fr. Scoryna Ave. 4, 220050, Minsk, phone: +375 17-209-54-80
e-mail: poliak@bsu.by

The effect of 245 MeV krypton ions implantation on the structural-phase state of Al-4 wt.% Cu alloy was investigated. It was shown that implantation with the dose of 10^{13} and 10^{14} Kr/cm^2 resulted in the decrease of the θ -phase inclusions density and in the change of their size. Hardening observed during implantation is the consequence of the hard solution enrichment by copper atoms and radiation-stimulated processes.