

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Ar^+ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ХОЛОДНОДЕФОРМИРОВАННОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Cu-Mg-Mn

А.А. Клепикова¹⁾, Н.В. Гущина¹⁾, В.В. Овчинников¹⁾, Ф.Ф. Махинько¹⁾, Л.И. Кайгородова²⁾

¹⁾Институт электрофизики УрО РАН,

ул. Амундсена 106, Екатеринбург, 620016, Россия, (343)267-87-74, chemer@iep.uran.ru

²⁾Институт физики металлов УрО РАН,

ул. Софьи Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620219, Россия

Методами механических испытаний на одноосное растяжение и просвечивающей электронной микроскопии проведены исследования воздействия облучения непрерывными пучками ионов Ar^+ с энергией $E = 20$ кэВ на механические свойства и структуру холоднодеформированного сплава ВД1 системы Al-Cu-Mg-Mn . Установлено, что при низких дозах облучения ($10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$) происходит трансформация исходной ячеистой дислокационной структуры в субзеренную, что приводит к незначительному снижению прочностных характеристик и постепенному росту относительного удлинения. При увеличении дозы облучения до $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ и выше формируется однородная крупнокристаллическая структура с размером зерен более 10 мкм. Это приводит к резкому повышению пластичности и снижению величины прочностных характеристик. Кроме того, при больших дозах облучения в сплаве наблюдается распад пересыщенного твердого раствора с выделением упрочняющей $\theta'(\theta'')$ -фазы (CuAl_2), что объясняет немонотонный характер изменения механических свойств при облучении высокими дозами.

Введение

В последнее время наблюдается значительный научный и практический интерес к ионно-лучевой обработке сплавов на основе алюминия [1, 2]. Это объясняется тем, что в последнее время роль этих сплавов в качестве конструкционных материалов современной техники постоянно возрастает. При этом к алюминиевым сплавам предъявляются все более высокие требования как к их свойствам, так и к стоимости полуфабрикатов и уровню производственных затрат. Все это стимулирует разработку принципиально новых алюминиевых сплавов и технологий их обработки.

Целью настоящей работы явилось изучение влияния ускоренных ионов Ar^+ средних энергий ($E = 20$ кэВ) на процессы перестройки дислокационной структуры, изменения фазового состава и механических свойств алюминиевого сплава ВД1 системы Al-Cu-Mg с добавками Mn (дуралюмин).

Основная часть

В исследовании использовались стандартные образцы для испытаний на одноосное растяжение, вырезанные из холоднодеформированных листов (степень деформации $\varepsilon = 60\%$) сплава ВД1, изготовленных на Каменск-Уральском металлургическом заводе. Толщина листов составляла 2 мм.

Облучение непрерывными пучками ионов Ar^+ проводилось на установке для ионно-лучевой имплантации, оснащенной ионным источником ПУЛЬСАР на основе тлеющего разряда с полым холодным катодом, разработанным в Институте электрофизики УрО РАН [6]. Энергия ионов составляла 20 кэВ, плотность ионного тока 150 мкА/см^2 , доза облучения варьировалась от 10^{15} до $7,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Температура образцов в ходе облучения контролировалась с помощью хромель-алюмелевой термопары. При низких дозах облучения ($10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$) образцы нагревались до температуры $\sim 40-130^\circ\text{C}$, при больших дозах ($\geq 10^{17} \text{ см}^{-2}$) – до

температуры 400°C , т.е. до температуры промежуточного отжига для данного сплава, применяемого в ходе холодной прокатки для снятия нагартовки.

Проведены статические испытания на одноосное растяжение образцов в исходном деформированном, отожженном и облученном состояниях при комнатной температуре по стандартной методике согласно ГОСТу 1497-84.

Электронно-микроскопическое исследование методом тонких фольг осуществляли в просвечивающем электронном микроскопе JEM-200 CX. Структура образцов изучалась в двух сечениях: параллельном облучаемой поверхности (на расстоянии 150 мкм от облученной поверхности) и перпендикулярном ей (по толщине образца).

Полученные результаты испытаний на одноосное растяжение облученных образцов сплава ВД1 свидетельствуют о том, что при низких дозах облучения $D = (10^{15} - 10^{16}) \text{ см}^{-2}$ происходит незначительное изменение механических свойств (рис. 1). Видно, что предел прочности σ_b и предел текучести $\sigma_{0,2}$ практически не изменяются по сравнению с исходным холоднодеформированным состоянием, в то же время относительное удлинение δ немного возрастает до $\sim 8\%$ (в исходном состоянии $\delta = 5,8\%$).

С увеличением дозы облучения до $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ предел прочности и предел текучести снижаются, относительное удлинение продолжает возрастать. После облучения дозой $D = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ резко возрастает предел прочности до 264 МПа, что превышает предел прочности в исходном холоднодеформированном состоянии $\sigma_b = 249 \text{ МПа}$. При этом предел текучести уменьшается до 150 МПа, а относительное удлинение значительно возрастает до 18 %. Дальнейшее увеличение дозы облучения до $D = 7,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ приводит к разупрочнению сплава, аналогичному разупрочнению после промежуточного отжига в печи ($T = 400^\circ\text{C}$, $t = 2 \text{ ч}$).

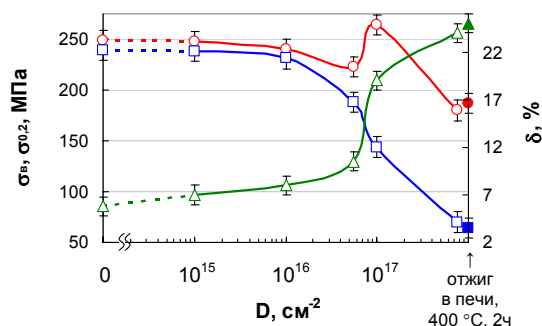


Рис. 1. Зависимость предела прочности σ_v (○), предела текучести $\sigma_{0,2}$ (□) и относительного удлинения δ (△) сплава ВД1 от дозы облучения ионами Ag^+ ($E = 20$ кэВ, $j = 150$ мкА/см²).

Результаты электронно-микроскопических исследований показали, что в исходном холоднодеформированном состоянии в сплаве наблюдается дислокационная ячеистая структура (рис. 2 а). Границами ячеек являются плотные сплетения дислокаций, что обеспечивает высокие прочностные свойства сплава. Диаметр ячеек колеблется в пределах от 0,5 до 2 мкм.

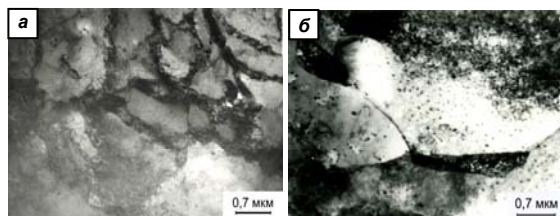


Рис. 2. Микроструктура сплава ВД1: а – в исходном холоднодеформированном состоянии; б – после отжига при температурах 380 - 420 °С в течение 2 ч.

После отжига при температурах 380 - 420 °С в течение 2 ч в сплаве ВД1 образуется рекристаллизованная зеренная структура с размером зерен более 10 мкм (рис. 2 б).

После облучения холоднодеформированного сплава ВД1 низкой дозой ионов Ag^+ $D = 10^{15}$ см⁻² (время облучения 1 с) в сплаве обнаружена развитая субзеренная структура (рис. 3).

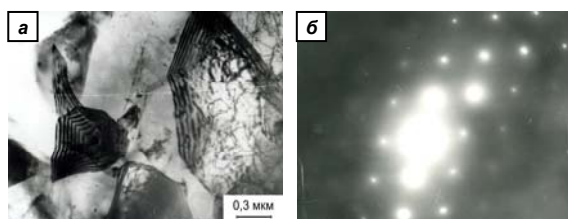


Рис. 3. Микроструктура сплава ВД1 после облучения ионами Ag^+ , $E = 20$ кэВ, $j = 150$ мкА/см², $D = 10^{15}$ см⁻²: а – светлоскопическое изображение субзеренной структуры; б – электронограмма с рефlekсами матрицы.

Субзерна преимущественно имеют равноосную форму. Их средний диаметр составляет 0,5-1,5 мкм. Границы субзерен имеют характерный полосчатый контраст, свойственный границам наклона. Отдельные дислокации в границах не разрешаются. Незначительное количество дисло-

каций сохраняется только в отдельных субзернах. Признаков распада пересыщенного твердого раствора с образованием упрочняющих фаз не обнаружено. На электронограммах сплава присутствуют только рефlekсы от матрицы (рис. 3 б).

На рис. 4 а представлено светлоскопическое изображение поперечного сечения холоднодеформированного образца. В этом сечении обнаружены полосы скольжения шириной менее 1 мкм. В полосах присутствуют хаотично распределенные сплетения дислокаций.

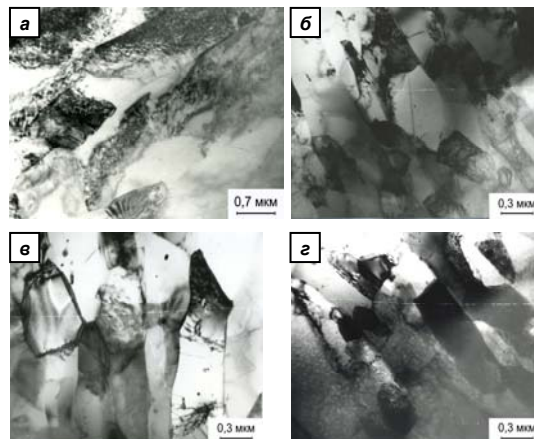


Рис. 4. Микроструктура сплава ВД1 в поперечном сечении: а – исходное холоднодеформированное состояние; б-г – после облучения ионами Ag^+ , $E = 20$ кэВ, $j = 150$ мкА/см², $D = 10^{15}$ см⁻² (б – вблизи облученной поверхности; в – центральная часть; г – вблизи необлученной поверхности).

Изучение поперечного сечения образца, облученного до дозы $D = 10^{15}$ см⁻², выявило, что в участках образца, граничащих с облученной поверхностью, наблюдаются равноосные субзерна диаметром 0,5-1 мкм (рис. 4 б). В его центральной части замечены субзерна как равноосной, так и вытянутой формы (рис. 4 в). С необлученной стороны субзерна имеют только вытянутую форму, частично сохраняется ячеистая структура (рис. 4 г).

Таким образом, можно заключить, что структурные изменения под действием облучения произошли практически во всем объеме образца толщиной ~ 2 мм, что в десятки тысяч раз превышает проективный пробег ионов Ag^+ в данном сплаве, который составляет согласно расчету методом TRIM ~20 нм при $E = 20$ кэВ. Однако чем дальше от облученной поверхности, тем интенсивность этих изменений ниже и вблизи необлученной стороны структура все еще близка к ячеистой.

Облучение сплава ВД1 пучком ионов Ag^+ дозой $D = 10^{17}$ см⁻² и выше приводит к формированию в сплаве крупнокристаллической структуры с размером зерен более 10 мкм. Фрагменты зерен, разделенных прямолинейными большеугловыми границами, приведены на рис. 5 а.

При облучении высокими дозами ($> 10^{17}$ см⁻²) в сплаве наряду с процессами рекристаллизации происходит распад твердого раствора с выделением мелкодисперсных частиц $\theta'(\theta'')$ -фазы состава $CuAl_2$ (рис. 5 б, в). Частицы в форме плоских

дисков диаметром 10-20 нм распределены равномерно, их плотность высока.

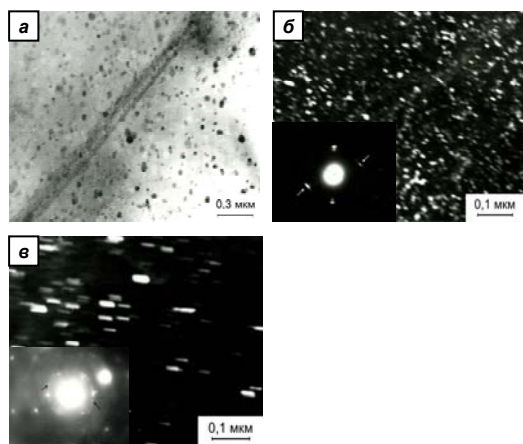


Рис. 5. Микроструктура сплава ВД1 после облучения ионами Ar^+ , $E = 20$ кэВ, $j = 150$ мкА/см²: а, б - $D = 10^{17}$ см⁻², в - $D = 7,5 \cdot 10^{17}$ см⁻², а - изображение фрагментов зерен; б, в - темнопольные изображения частиц $\theta'(\theta'')$ -фазы и соответствующие электронограммы, отмечены рефлексы фазы $\theta'(\theta'')$.

Это хорошо объясняет немонотонный характер изменения механических свойств, а именно рост предела прочности σ_b . При этом резкое повышение относительного удлинения δ и снижение величины предела текучести $\sigma_{0,2}$, несмотря на высокую плотность равномерно распределенных выделений, можно объяснить интенсивным ростом зерна.

Повышение дозы облучения до $D = 7,5 \cdot 10^{17}$ см⁻² привело к увеличению до 50 нм диаметр основной упрочняющей фазы $\theta'(\theta'')$ (рис. 5 в) и уменьшению плотности распределения этой фазы более чем в 3 раза, что способствовало дальнейшему снижению предела текучести и предела

прочности и увеличению относительного удлинения.

Заключение

В ходе проведенных исследований установлена зависимость механических свойств и структурных изменений в холоднодеформированном сплаве ВД1 от дозы облучения ионами Ar^+ ($E = 20$ кэВ, $j = 150$ мкА/см²). При низких дозах облучения $10^{15} - 10^{16}$ см⁻² (время облучения ~ 1 и 10 с) прочностные характеристики не изменяются при росте относительного удлинения в ~ 2 раза. Методом просвечивающей электронной микроскопии установлено, что это связано с трансформацией исходной ячеистой дислокационной структуры и образованием развитой субзеренной структуры.

После облучения высокими дозами $> 5 \cdot 10^{16}$ см⁻² (время облучения ~ 100 с) наблюдается существенное разупрочнение сплава ВД1. При некоторых режимах обработки наблюдается рост предела прочности до значений, превышающих исходные, при сохранении высокими пластических характеристик. Электронно-микроскопически было установлено, что такое разупрочнение и немонотонное изменение механических свойств связано с протеканием конкурирующих процессов рекристаллизации с формированием однородной крупнокристаллической структуры с размером зерен более 10 мкм и распада пересыщенного твердого раствора с выделением мелкодисперсных частиц $\theta'(\theta'')$ -фазы (CuAl_2).

Список литературы

1. Овчинников В.В., Гущина Н.В., Махинько Ф.Ф. и др. // Известия вузов. Физика, 2007, № 2. С. 73-81.
2. Овчинников В.В. // УФН. 2008. Т. 178. № 9. С 991-1001.
3. Гаврилов Н.В., Никулин С.П., Радковский Г.В. // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 1. С. 93-98.

EFFECT OF IRRADIATION WITH MEDIUM-ENERGY Ar^+ IONS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE COLD-WORKED ALLOY OF THE SYSTEM Al-Cu-Mg-Mn

A.A. Klepikova¹), N.V. Gushchina¹), V.V. Ovchinnikov¹), F.F. Machinko¹), L.I. Kaigorodova²)

¹)Institute of Electrophysics, UB RAS, ul. Amundsena 106, Yekaterinburg, 620016 Russia, (343)267-87-74, chemer@iep.uran.ru

²)Institute of Metal Physics, UB RAS, ul. S. Kovalevskoi 18, Yekaterinburg, 620219 Russia

Methods of mechanical uniaxial tension tests and transmission electron microscopy have been used to research an effect of radiation with continuous argon ion beams of $E = 20$ keV energy on the mechanical properties and structure of the cold-worked VD1 alloy of the system Al-Cu-Mg-Mn. It was found that under low irradiating doses ($\sim 10^{15}$ см⁻²) an initial cellular dislocation structure undergoes a transformation into the subgrain one, which causes a slight decrease in strength characteristics and a gradual increase in elongation. With increase in a radiation dose up to $1 \cdot 10^{17}$ см⁻² or greater than that, a homogeneous coarse-grained structure with a grain size of more than 10 microns is formed. This leads to a sharp increase in plasticity and to decrease in values of strength characteristics (like what is happening during the annealing). In addition, at high doses of irradiation there is observed supersaturated solid solution decomposition with precipitation of hardening $\theta'(\theta'')$ -phase (CuAl_2) in the alloy, which results in a significant increase in tensile strength.