

## Влияние ЭДУ на прочностные свойства сплавов системы Cu-Al, подвергнутых РКУП при криогенной температуре

Л. И. Зайнуллина<sup>1</sup>, И. В. Александров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> lele4ka.06@mail.ru, <sup>2</sup> igorvalexandrov@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** Изучено влияние энергии дефекта упаковки (ЭДУ) на прочностные характеристики сплавов системы Cu-Al с различным содержанием Al. Сплавы перед деформацией растяжением подвергли интенсивной пластической деформации равноканальным угловым прессованием (РКУП) при температуре жидкого азота. Показано, что увеличение концентрации Al в материале, т.е. уменьшение ЭДУ, приводит к увеличению объемной доли двойников, при этом прочность материала повышается.

**Ключевые слова:** механизмы деформации; энергия дефекта упаковки; равноканальное угловое прессование.

### ВВЕДЕНИЕ

Энергия дефекта упаковки (ЭДУ) является одной из важнейших характеристик материала, которая определяет механизмы деформации в металлах и сплавах. Известно [1–3], что в гранецентрированных кубических (ГЦК) металлах и сплавах с более низкими значениями ЭДУ способность к двойникованию выше. В последние годы растет интерес к исследованию роли двойников в наноматериалах [4–7]. Двойники определяют характер деформационного поведения материалов. Было показано, что прочность материалов увеличивается с увеличением плотности двойниковых границ. Кроме того, известно, что понижение температуры также способствует активизации двойникования.

Целью настоящей работы стало изучение влияния ЭДУ на прочностные характеристики в сплавах системы Cu-Al с различным содержанием Al, подвергнутых интенсивной пластической деформации при температуре жидкого азота.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для исследований в данной работе были выбраны сплавы системы Cu-Al с содержанием алюминия 2,2; 4,5 и 7,0 вес.%, соответственно. ЭДУ этих сплавов приблизительно составила 25, 12 и 5 мДж/м<sup>2</sup>, соответственно [8]. Заготовки в форме стержней с квадратным поперечным сечением размером 12 × 12 × 80 мм перед интенсивной пластической деформацией отжигали в вакууме при температуре 1073 К в течение 2 ч, затем медленно охлаждали до температуры 773 К и закаливали в воду. РКУП при температуре жидкого азота проводили со скоростью 0,25 мм·с<sup>-1</sup> с внешним углом пересечения каналов в оснастке  $\psi = 0^\circ$  и внутренним углом  $\phi = 120^\circ$ . Все заготовки подвергали одному проходу РКУП с эквивалентной степенью деформации 0,7. Образцы погружали в жидкий азот на время 5 – 10 минут до интенсивной пластической деформации. Оснастку для РКУП во время пластической деформации непрерывно охлаждали жидким азотом. Проведение 1 прохода РКУП не привело к формированию структуры с наноразмерными зёрнами, однако в материале были сформированы нанодвойники.

Микроструктуру изучали с помощью просвечивающего электронного микроскопа JEOL 2100 (ПЭМ) с ускоряющим напряжением 200 кВ при увеличении  $\times 10000$ . Образцы для исследований были вырезаны вдоль направления деформации. Фольги для исследований были подготовлены в электролите состава 33 % азотной кислоты и 67 % метанола при температуре  $-25\text{ }^\circ\text{C}$ . Анализ поверхностной доли двойников проводили путем подсчета площади двойника, предполагая, что он прямоугольный, относительно площади изображения ПЭМ. Для статистического анализа было рассчитано более 15 изображений ПЭМ.

Твердость по Виккерсу определяли на микротвердомере Struers Duramin, для чего на подготовленные образцы накладывали нагрузку 100 граммов в течение 10 секунд.

Механические испытания на растяжение проводили на разрывной машине Instron 8801 при комнатной температуре со скоростью деформации 0,24 мм/мин. Для испытаний использовали плоские образцы, вырезанные вдоль направления деформации, с начальной рабочей частью 4 мм.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены построенные по результатам проведенных экспериментальных исследований инженерные кривые растяжения образцов исследованных состояний.

Величины предела прочности, рассчитанные исходя из указанных инженерных кривых растяжения, для состояний после РКУП равны  $302\pm 35$  МПа для сплава Cu-2,2%Al,  $533\pm 79$  МПа для сплава Cu-4,5%Al и  $554\pm 99$  МПа для сплава Cu-7,0%Al соответственно. При этом относительное удлинение для сплава Cu-2,2%Al составило  $19\pm 4\%$ , для сплава Cu-4,5%Al –  $8\pm 2\%$ , а для сплава Cu-7,0%Al –  $12\pm 2\%$ . Как видно, понижение ЭДУ при одинаковых условиях РКУП приводит к росту предела прочности исследованных материалов и немонотонному изменению пластичности.

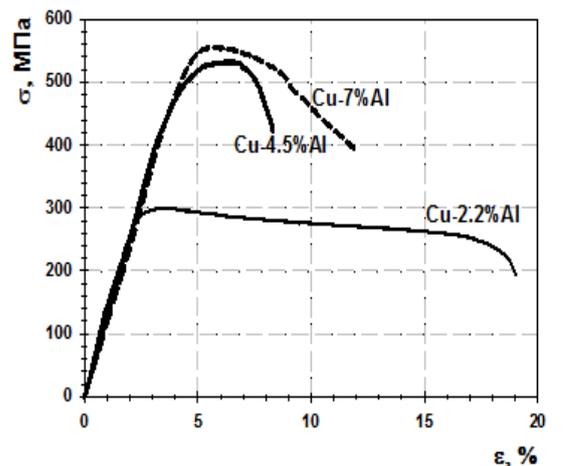


Рис. 1. Инженерные кривые  $\sigma - \varepsilon$

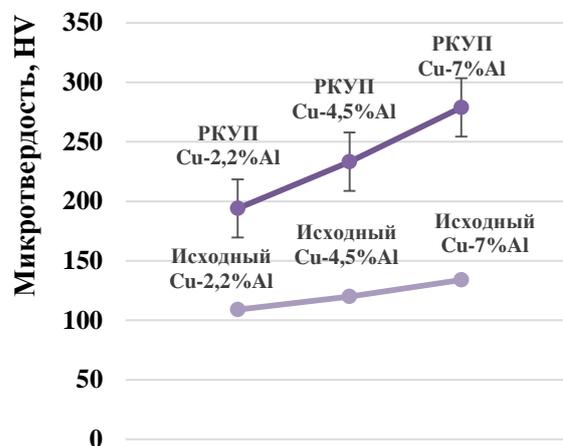
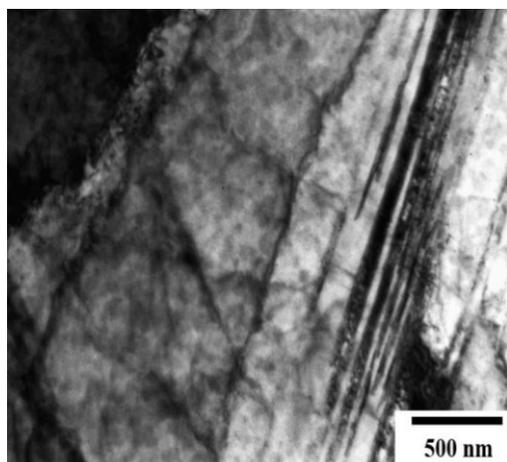


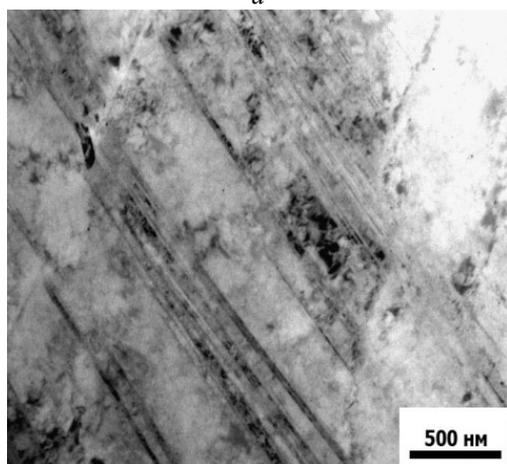
Рис. 2. Изменение микротвердости в зависимости от ЭДУ

После проведения РКУП наблюдается изменение микротвердости в данных сплавах по сравнению с исходным состоянием. На рис. 2 представлена диаграмма изменения твердости в зависимости от ЭДУ. Микротвердость для сплава Cu-2,2%Al в исходном состоянии составила  $109\pm 4$  HV, после проведения РКУП микротвердость возросла в 1,7 раз и составила  $194\pm 15$  HV. Для сплава с содержанием 4,5%Al микротвердость в исходном состоянии составила  $120\pm 8$  HV, после РКУП наблюдается увеличение микротвердости в 1,9 раз и составляет  $233\pm 13$  HV. Проведение РКУП позволило повысить микротвердость в сплаве Cu-7%Al до  $279\pm 22$  HV, что в два раза выше микротвердости в исходном состоянии ( $134\pm 7$  HV).

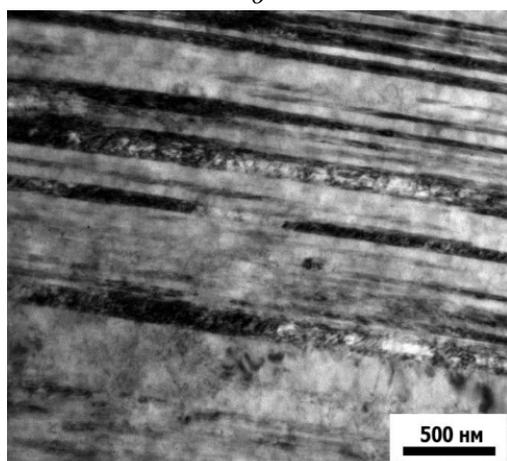
Исследования тонкой структуры образцов сплавов Cu-2,2%Al, Cu-4,5%Al, Cu-7,0%Al показали, что интенсивная пластическая деформация при пониженной температуре приводит к образованию двойников (рис. 2, а–в).



а



б



в

Рис. 2. Тонкая структура сплавов после РКУП:  
а – Cu-2,2%Al; б – Cu-4,5%Al, Cu-7,0%Al

Статистическая обработка структурных особенностей на ПЭМ изображениях показала, что в образце с содержанием 2,2%Al доля

двойников составляет 9 %, при этом средняя толщина двойников –  $44 \pm 2$  нм (рис. 2, а), доля двойников в сплаве Cu-4,5%Al в среднем составляет 8 %, при этом размер толщины двойников –  $37 \pm 2$  нм (рис. 2, б). В то же время в образце сплава с содержанием 7,0 %Al среднее значение доли двойников резко возрастает до 20 %, а толщина двойников составила  $46 \pm 2$  нм (рис. 2, в).

Таким образом, объемная доля деформационных двойников в сплавах системы Cu-Al, подвергнутых интенсивной пластической деформации, увеличивается с увеличением концентрации Al, то есть уменьшением ЭДУ, а размеры толщин двойников изменяются незначительно. При этом происходит увеличение прочностных характеристик. В [9] отмечается, что влияние двойниковых границ на прочность идентично воздействию обычных границ зерен даже при наноразмерах двойников.

## ВЫВОДЫ

Установлено, что уменьшение энергии дефекта упаковки в сплавах Cu-Al, подвергнутых интенсивной пластической деформации, приводит к монотонному росту прочностных характеристик. Объемная доля деформационных двойников изменяется с понижением энергии дефекта упаковки немонотонно, что, по-видимому, обеспечивает немонотонный характер изменения пластичности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blewitt T. H., Coltman P. R., Redman J. K. Low-temperature deformation of copper single crystals, *J. Appl. Phys.*, no. 28, pp. 651, 1957.
2. Danaf E. E., Kalidindi S. R., Doherty R. D. Influence of grain size and stacking-fault energy on deformation twinning in fcc metals, *Metall. Mater. Trans. A*, no. 30A, pp. 1223, 1999.
3. Greulich F., Murr L. E. Effect of grain size, dislocation cell size and deformation twin spacing on the residual strengthening of shock-loaded nickel, *Mater. Sci. Eng.*, no. 39, pp. 81, 1979.
4. Lu L., Shen Y.F., Chen X. H., Qian L. H., Lu K. Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper, *Science*, no. 304, pp. 1096, 2004.
5. Zhang X., Misra A., Wang H., Shen T. D., Nastasi M., Mitchell T. E., Hirth J. P., Hoagland R. G., Embury J. D. Enhanced hardening in Cu/330 stainless steel multilayers by nanoscale twinning, *Acta Mater.*, no. 52, pp. 995, 2004.
6. Zhang Y., Tao N.R., Lu K. Mechanical properties and rolling behaviors of nano-grained copper with embedded nano-twin bundles, *Acta Mater.*, no. 56, pp. 2429, 2008.

7. Zhao H., Bingert J.F., Liao X.Z., Cui B.Z., Han K., Sergueeva A.V., Mukherjee A.K., Valiev R.Z., Langdon T.G., Zhu Y.T. Simultaneously increasing the ductility and strength of ultra-fine grained pure copper, *Adv. Mater.*, no. 18, pp. 2949, 2006.

8. Wei W., Wang S.L., Wei K.X., Alexandrov I.V., Du Q.B., Hu J. Microstructure and tensile properties of Cu-Al alloys processed by ECAP and rolling at cryogenic temperature, *J. of All. and Comp.*, no. 678, pp. 506, 2016.

9. Shen Y.F., Lu L., Lu Q.H., Jin Z.H., Lu K. Tensile properties of copper with nano-scale twins, *Scripta Mater.*, no. 52, pp. 989, 2005.

#### ОБ АВТОРАХ

**ЗАЙНУЛЛИНА** Лилия Ильгизовна, асп. каф. физики.

**АЛЕКСАНДРОВ** Игорь Васильевич, д-р физ.-мат. наук, проф. каф. физики.

#### METADATA

**Title:** Influence of SFE on strength properties of Cu-Al alloys system, subjected to ECAP at cryogenic temperature

**Authors:** L. I. Zaynullina<sup>1</sup>, I. V. Alexandrov<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>lele4ka.06@mail.ru, <sup>2</sup>igorvalexandrov@yandex.ru,

**Language:** Russian.

**Source:** *Molodezhnyj Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (21), pp. 52-55, 2019. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** In this paper, we studied the effect of the stacking fault energy (SFE) on the strength characteristics of the Cu – Al alloys system with different Al contents. Alloys before deformation by stretching were subjected to severe plastic deformation by equal-channel angular pressing (ECAP) at liquid nitrogen temperature. It is shown that an increase in the Al concentration in the material, that is, a decrease in the SFE, leads to an increase in the volume fraction of twins, while the strength of the material increases.

**Key words:** Deformation mechanisms, stacking fault energy, equal-channel angular pressing.

**About authors:**

**ZAYNULLINA, Liliya Ilgizovna**, Postgrad. (PhD) Student, Dept. of Physics, Ufa state aviation technical University

**ALEXANDROV, Igor Vasilevich**, Prof. Dept. of Physics, Dr. of Phys.-Mat. Sci., Ufa state aviation technical University