

## ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ФОЛЬГАХ Cu ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Бадиян Е.Е., Тонкопряд А.Г., Шуринов Р.В., Дергачева А.В.

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина,  
г. Харьков, Украина, E-mail: evgeny.e.badiyan@univer.kharkov.ua

### Введение

Обширный экспериментальный и теоретический материал, накопленный к настоящему времени в физике прочности и пластичности, не может дать однозначного толкования наблюдаемому многообразию релаксационных процессов, осуществляющихся на различных структурных уровнях (микро-, мезо- и макроуровне). Основной причиной этого прежде всего является многообразие структурного состояния реальных поликристаллических материалов, структура которых содержит значительное число различных зерен, отличающихся кристаллографической ориентацией и дефектной структурой, формой и размерами. Следует учитывать и достаточно большое разнообразие границ зерен, которые в зависимости от их структуры, вносят различный вклад в развитие релаксационных процессов при пластическом деформировании образцов. В связи с этим в данной работе проведено экспериментальное изучение влияния исходной структуры образцов и типа границ зерен на развитие релаксационных процессов при развитии пластической деформации (ПД) фольг меди.

### Объект исследования и методика проведения эксперимента

Целью настоящей работы является установление способов релаксации напряженного состояния при ПД однокристалльных по толщине (двумерных поликристаллов) фольг Cu с различной исходной зеренной структурой и различным содержанием специальных границ зерен, в том числе и двойниковых. Выбор в качестве объекта исследования образцов Cu обусловлен тем, что медь является ярким представителем металлов с гцк-решеткой, но имеющей низкую энергию дефекта упаковки [1]. Дислокационная структура кристаллов с низким значением величины энергии дефекта упаковки характеризуется наличием в структуре образца расщепленных дислокаций, движение которых затруднено при пластической деформации. При развитии ПД решеточные дислокации по-разному взаимодействуют с границами общего и специального типа [2], что должно сказаться на развитии релаксационных процессов при пластическом деформировании.

Исследовались поликристаллические фольги Cu с размерами рабочей части  $70 \times 10$  мм<sup>2</sup>, толщиной 400 мкм, которые вырезали из медной фольги чистотой 99,97%. Для получения образцов с различной микроструктурой они подвергались термомеханической обработке, которая включала в себя: первичный отжиг при  $T=700^\circ$  С в течение двух часов; деформацию одноосным растяжением от 3 до 7%; рекристаллизационный отжиг при  $T=950^\circ$  С в течение от трех до шести часов в вакууме  $P=10^{-2}$  Па. Зеренную структуру выявляли химическим травлением с помощью спиртового раствора концентрированной азотной кислоты, время травления ~5 с. Варьируя степень деформации перед рекристаллизационным отжигом и время отжига, были получены образцы с различной структурой. По данным рентгенографических исследований проводилась аттестация границ зерен. Установлено, что в структуре полученных фольг Cu присутствует большое количество двойников отжига, различающихся по форме, размерам и ориентации, а двойниковые границы преимущественно представляют собой когерентные границы с  $\Sigma 3$ ,  $60^\circ$ , [111], а также границы зерен общего и специального типа, количественное соотношение которых зависит от условий рекристаллизации. Механические испытания проводились в условиях активного одноосного растяжения со скоростью деформации  $\dot{\epsilon}=5 \cdot 10^{-5}$  с<sup>-1</sup> при комнатной температуре.

Для исследования возникновения и развития ротационных эффектов на поверхности образцов непосредственно в процессе деформации была использована оригинальная оптическая методика получения in situ цветовых ориентационных карт [3]. Микроструктура образцов до и после деформации и деформационный рельеф,

возникающий, в основном, в результате развития трансляционной моды ПД, исследовались с помощью оптической микроскопии (МИМ-7, ПМТ-3) и интерферометрии (МИИ-4).

**Экспериментальные результаты**

Все многообразие структур исследованных образцов условно можно разделить на три типа:

1. Образцы, содержащие только двойниковые границы («монокристаллы», содержащие сквозные двойники) (рис.1,а);

2. Крупнозернистые образцы со средним размером зерна  $\bar{d} \approx 7$  мм, содержащие до ~50% специальных границ (в том числе и двойниковых) (рис.1,б);

3. Мелкозернистые образцы с  $\bar{d} \approx 0,5$  мм, содержащие до ~70% специальных границ (в том числе и двойниковых) (рис.1,в). Все границы раздела в исследуемых образцах являются сквозными. Основные механические характеристики исследованных образцов приведены в таблице 1.

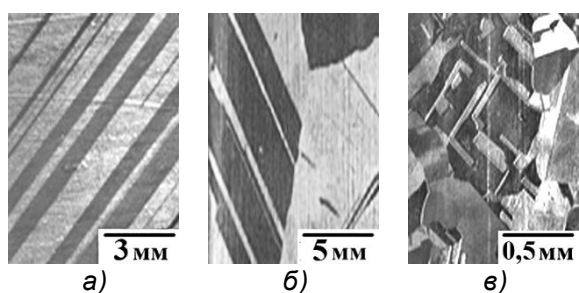


Рисунок 1 – Фрагменты микроструктуры исследуемых фольг Cu

Таблица 1 – Механические характеристики фольг Cu

Тип образца	Усл. предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Деформ. до разрушения $\epsilon_{max}$ , %
I	35	100	6
II	30	125	12
III	60	480	21

В образцах Cu первого типа в процессе пластического деформирования наряду с развитием дислокационного скольжения вблизи двойниковых границ, которые пересекают всю поверхность образца, возникают экструзии на поверхности образца, а на противоположной стороне – интрузии, о чем свидетельствуют интерферометрические исследования (рис.2,а,б). Образование экструзии и интрузии как способов релаксации напряженного состояния не свойственно для гцк-кристаллов, деформируемых в условиях активного нагружения. Как правило, формирование экструзий и интрузий происходит при усталостных испытаниях образцов в области устойчивых полос скольжения [4] и определяется легкостью протекания поперечного скольжения, которое в меди из-за низкой энергии упаковки всегда затруднено. Для объяснения возникновения экструзий и интрузий при пластическом деформировании фольг Cu, по-видимому, следует учитывать скольжение во вторичных системах скольжения. Установлено, что при ориентации оси растяжения образца, близкой к направлению [112], наряду с первичной системой скольжения (111)[011] деформация осуществляется и по вторичной, сопряженной системе скольжения (111)[101]. Таким образом, возможной причиной возникновения экструзии – интрузии, как способа релаксации напряженного состояния при развитии ПД, может быть специфическая кристаллографическая ориентация оси растяжения образца, его толщина и наличие сквозной двойниковой границы.

Релаксация напряженного состояния при ПД в фольгах Cu второго и третьего типа реализуется за счет развития одиночного и множественного дислокационного скольжения (наиболее активно протекает в образцах третьего типа) и образования одиночных и коллективных полос переориентации (ПП) (преимущественно в образцах второго типа). Для примера, на рисунке 2 приведены фрагменты поверхности микроструктуры образцов Cu после деформации ( $\epsilon \approx 12\%$ ). Видно, что в деформированных образцах в отдельных зернах наблюдаются следы одиночного и множественного дислокационного скольжения, в некоторых зернах образуются полосы переориентации – один из способов реализации ротационной моды пластической деформации.

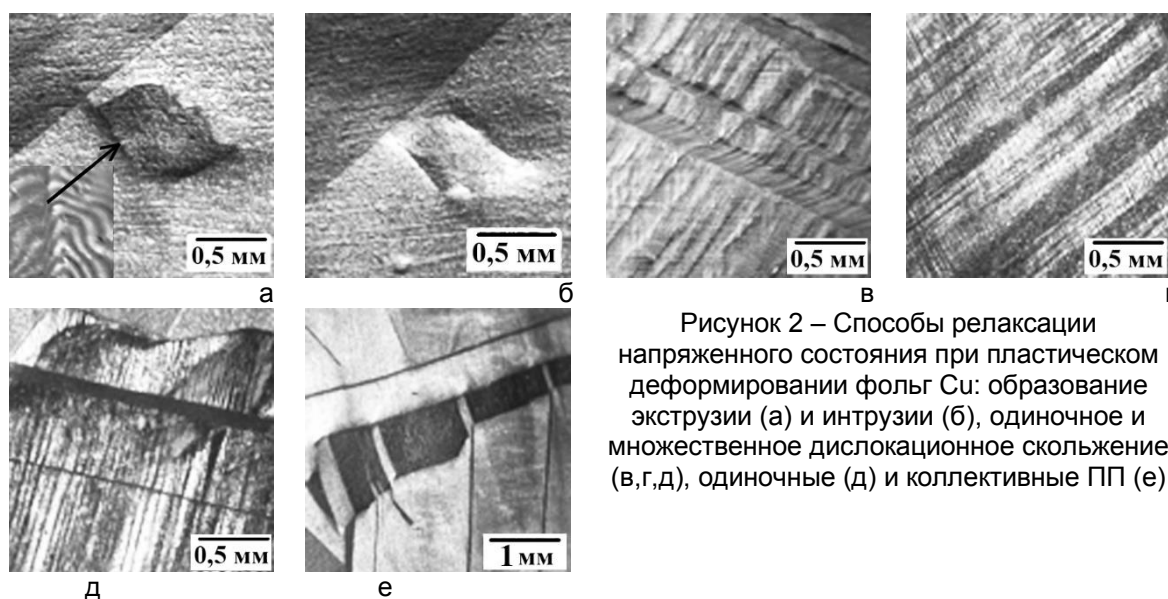


Рисунок 2 – Способы релаксации напряженного состояния при пластическом деформировании фольг Cu: образование экструзии (а) и интрузии (б), одиночное и множественное дислокационное скольжение (в,г,д), одиночные (д) и коллективные ПП (е)

Экспериментально установлено, что общим для всех исследованных образцов Cu, содержащих в исходной структуре двойники отжига, является то, что ПД не развивается двойникованием; при развитии ПД двойники отжига не объединяются, двойниковые границы не смещаются. Через тонкие двойники скольжение передается от зерна к зерну (рис.2,д). В двойниках, которые не подпадают под определение тонкого двойника, может протекать самостоятельное дислокационное скольжение внутри двойника в соответствии с его кристаллографической ориентацией (рис.2,в).

### Выводы

Обнаружено, что в фольгах Cu, содержащих только двойниковые границы, пересекающие всю ширину образца, релаксация напряженного состояния в процессе ПД осуществляется за счет одиночного и множественного дислокационного скольжения, а также за счет возникновения экструзии и интрузии. Релаксация напряженного состояния при ПД в крупно- и мелкозернистых фольгах Cu, содержащих от 50 до 70% СГЗ, развивается одиночным и множественным скольжением и за счет возникновения ротационных эффектов. Мелкозернистые фольги Cu обладают высокими прочностными характеристиками, а высокое содержание СГЗ в этих образцах способствует существенному увеличению их пластичности.

### Список литературы:

1. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: «Металлургия», -1986 - 224 с.
2. Перевалова О. Б. Влияние энергии плоских дефектов и фазового перехода  $Al \rightarrow Li_2$  на характеристики зернограницного ансамбля ГЦК твердых растворов на основе Ni, Cu и Pd // дисс. на соиск. д-ра физ.-мат. н., Томск, 2007. 333 с.
3. Badiyan E. E., Tonkopyrad A. G., Shehovtsov O. V., Shorinov R. V., Zetova T. R. Optical Technique for the In Situ Study of Orientation and Structure Changes Accompanied the Plastic Deformation of Polycrystalline Specimens of Aluminum // Inorganic Materials. – 2011. – №15. – P. 1663 – 1666.
4. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972, 408 с.