

УДК 669.3:539.89:539.25

## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕДИ

Конькова Т. Н. \*, Миронов С. Ю. \*\*, Корзников А. В. \*

*\*Учреждение Российской академии наук Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 450001, г. Уфа, ул. Халтурина, 39, Россия*

*\*\*Университет Тохоку, Департамент Обработки Материалов, Высшая Школа Инженеров, 980-8579, Сендай, Арамаки-аза-Аоба, 6-6-02, Япония*

*E-mail: konkova\_05@mail.ru*

Разработка и получение металлов и сплавов с размером зерен в десятые и сотые доли микрометра (субмикро- и нанокристаллов) с заданными физико-химическими свойствами является важной проблемой современного материаловедения [1]. В последнее время был проведен ряд попыток использования криогенной деформации для измельчения размера зерен [2-4], причем большая часть этих работ была выполнена на высокопластичной меди. Представляется актуальным подробное изучение микроструктуры после криогенной деформации, а также механизмов ее формирования. Данная работа была направлена на тщательную аттестацию микроструктуры меди, подвергнутой различной степени низкотемпературной деформации. Для аттестации микроструктуры был привлечен относительно новый метод автоматического анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) [5].

**Материал и методика эксперимента.** В качестве материала исследования использовалась технически чистая (99.9%) медь марки М1. Горячекатаный пруток был разрезан на части диаметром 40 мм и длиной 70 мм и подвергнут мультиосевой деформации в интервале температур 500-300°C. Полученный материал характеризовался средним размером зерен ~ 1.7 мкм, долей большеугловых границ ~ 59% и слабой “текстурой куба”, был принят в качестве исходного.

Для низкотемпературной осадки использовались цилиндрические образцы диаметром 24 мм и высотой 60 мм. Образцы, предварительно помещенные в оболочку из стали Ст20 с толщиной стенки 8 мм, охлаждались в контейнере с жидким азотом, затем подвергались осадке на гидравлическом прессе ПА-2638 при начальной скорости деформации ~  $6 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Степень деформации составляла 88% по высоте, что примерно соответствует истинной деформации  $\epsilon \sim 2.2$ . При описании процесса осадки использовалась система координат, включающая в себя направление осадки (НО) и радиальное направление (РН).

С целью изучения влияния изменения пути деформирования на измельчение микроструктуры была использована комбинированная низкотемпературная деформация по схеме “осадка + “abc” деформация”. Образцы для второй стадии деформации имели призматическую форму и размеры  $8 \times 6 \times 6 \text{ мм}^3$ , вырезались из центральной (наиболее деформированной) части осажённых заготовок. Эксперимент проводился в среде жидкого азота на гидравлическом прессе EU-100 посредством последовательных операций сжатия примерно на 45% по высоте вдоль трех ортогональных осей образца. Начальная скорость деформации составляла ~  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . В общей сложности образцы были подвергнуты 10 осадкам; накопленная истинная деформация была оценена как  $\epsilon \sim 8.2$ . При описании процесса “abc” деформации использовалась система координат, включающая в себя направление осадки (НО) и поперечное направление (ПН).

Все микроструктурные исследования осуществлялись при комнатной температуре. Аттестация микроструктур осуществлялась посредством EBSD. EBSD-анализ

проводился при помощи программного обеспечения TSL OIM™, установленного на сканирующем электронном микроскопе с полевым катодом Hitachi S-4300SE.

### Результаты и обсуждение

**Морфология микроструктуры и размер зерен.** Высокорастворяющие EBSD карты микроструктур после криогенной деформации, снятые с шагом сканирования 25–50 нм, приведены на рис. 1. Малоугловые границы (МУГ) обозначены тонкими серыми линиями, а большеугловые границы (БУГ) – толстыми темными линиями.

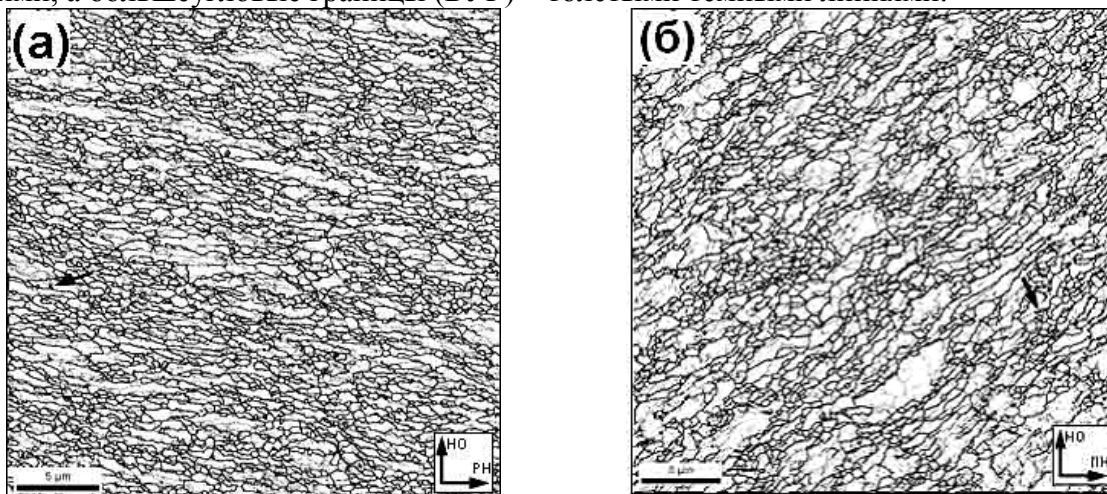


Рис. 1. EBSD карты микроструктуры после низкотемпературной деформации: (а) осадка в оболочке, (б) осадка + “abc” деформация.

Несмотря на довольно большие степени деформации, НК диапазон размеров зерен не был достигнут. Как следует из рис. 1, микроструктура, в первом приближении, может быть описана как совокупность относительно крупных (до нескольких мкм) и мелких ( $< 1\text{ мкм}$ ) зерен; в некоторых случаях имеет место “структура ожерелья”. Морфология структуры косвенно свидетельствует о протекании частичной рекристаллизации в ходе/после криогенной деформации. Геометрический эффект (в соответствии с которым зерна деформируются как и весь образец в целом), по-видимому, играет существенную роль в формировании структуры при криогенной деформации. МУГ характеризуются небольшим углом разориентировки, а большеугловые сегменты субграниц встречаются очень редко. По-видимому, процесс фрагментации развивался не интенсивно. В микроструктуре отмечается наличие двойников. Однако их удельная доля не высока, что свидетельствует о малозначительной роли этого механизма в формировании микроструктуры. Обобщая вышесказанное, можно предположить, что формирование структуры в ходе/после криогенной деформации, в целом, контролируется сочетанием геометрического эффекта деформации с процессами рекристаллизации, фрагментации и двойникования.

**Спектр разориентировок границ зерен.** Спектры разориентировок границ зерен характеризуются ярко выраженным малоугловым максимумом (рис. 2), доля БУГ не превышает 52%. В соответствии с работой [6], повышенное содержание МУГ может быть чревато аномальным ростом зерен при повышенных температурах.

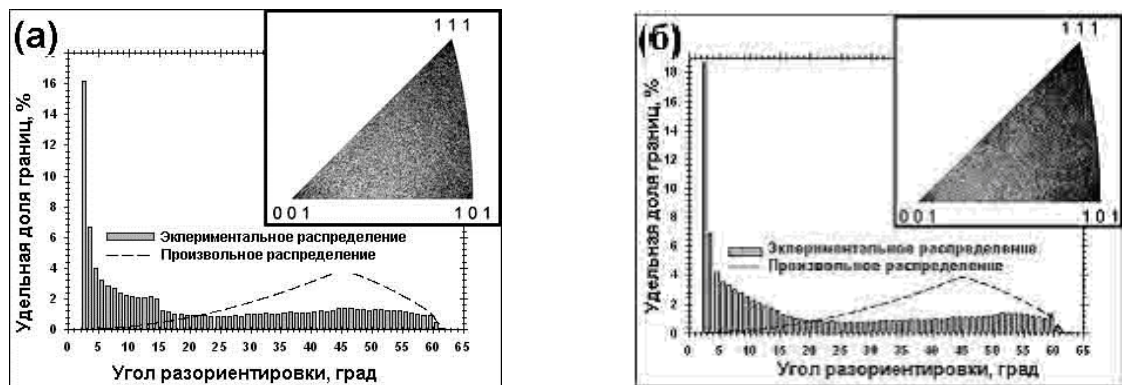


Рис. 2. Спектры разориентировок границ зерен в материале после низкотемпературной деформации: (а) осадка в оболочке, (б) осадка + “abc” деформация.

**Текстура.** Текстурные данные, полученные с криогеннодеформированных образцов методом EBSD-анализа, свидетельствуют об образовании в обоих случаях обычной аксиальной текстуры, в которой кристаллографическое направление  $\langle 110 \rangle$  тяготеет к оси осадки. Формирование вполне обычных текстур позволяет заключить, что основным механизмом пластического течения в условиях эксперимента было, по-видимому, обычное для ГЦК металлов  $\{111\}\langle 110 \rangle$  дислокационное скольжение.

**Выводы.** В данной работе оценивалась возможность формирования НК структуры в меди в результате низкотемпературной деформации. На основе работы сформулированы следующие выводы.

1) К числу характерных черт микроструктур, сформировавшихся в результате низкотемпературной деформации, можно отнести наличие небольшой фракции рекристаллизованных зерен, высокую долю МУГ (~ 50%), небольшое содержание двойников и относительно слабую текстуру.

2) Резкое изменение пути деформирования в криогенных условиях посредством комбинирования осадки в оболочке с последующей “abc”-деформацией не способствует интенсификации процесса измельчения микроструктуры.

Авторы благодарны профессору Салищеву Г.А. за идею данного исследования. Они также очень признательны к.т.н. Галееву Р.М. и к.т.н. Валиахметову О.Р. за осуществление горячей “abc” деформации, а также к.ф.-м.н. Даминову Р.Р. за помощь в проведении криогенной осадки.

### Литература.

- [1] Валиев Р.З, Александров И.В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. - М.: Логос, 2000. 272 с.
- [2] Y. Huang, P.B. Prangnell, The effect of cryogenic temperature and change in deformation mode on the limiting grain size in a severely deformed dilute aluminium alloy, Acta Mater. 56 (2008) 1619–1632.
- [3] Y.S. Li, N.R. Tao, K. Lu, Microstructural evolution and nanostructure formation in copper during dynamic plastic deformation at cryogenic temperatures, Acta Mater. 56 (2008) 230–241.
- [4] Y. Zhang, N.R. Tao, K. Lu, Mechanical properties and rolling behaviors of nano-grained copper with embedded nano-twin bundles, Acta Mater. 56 (2008) 2429–2440.
- [5] F.J. Humphreys, Characterisation of fine-scale microstructures by electron backscatter diffraction (EBSD), Scripta Mater. 51 (2004) 771–776.
- [6] Humphreys F.J. A unified theory of recovery, recrystallization and grain growth, based on the stability and growth of the cellular microstructures – I. The basic model, Acta mater. 45 (1997) 4231–4240.