

PACS: 61.72.Mm, 62.20.Fe, 62.20.Qp, 81.40.Ef, 81.40.Lm

Л.Ф. Сенникова, В.М. Ткаченко, А.Н. Гангало, В.В. Бурховецкий,
Г.К. Волкова, В.А. Глазунова

ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННОЙ ПОРИСТОСТИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕДИ М06 ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2018 года

Представлены результаты исследований эволюции зеренной и дефектной структуры меди М06 (99.99%) в процессе деформации разными схемами равноканального углового прессования (РКУП) и влияния этих структурных характеристик на механические и физические свойства материала. Показана зависимость деформационного разуплотнения и твердости меди от степени деформации для разных схем РКУП. Установлено, что при деформации РКУП с большой суммарной степенью, но в дробном режиме ($e < 1$), деформационная пористость меди меньше по сравнению с традиционным РКУП ($e \geq 1$).

Ключевые слова: медь, равноканальное угловое прессование, структура, твердость, деформационная пористость, плотность, микропоры, микротрещины, разуплотнение

Введение

Создание новых материалов, применяемых в атомной технике, металлургии, энергомашиностроении, микроэлектронике, космической технике и многих других областях промышленности, в той или иной степени связано с проблемой пористости, оказывающей существенное влияние на служебные характеристики материалов. Для прогнозирования их стабильности при эксплуатации в условиях многофакторных воздействий необходимы сведения о механизмах и кинетике процессов развития пористости в кристаллических телах.

По общепринятым представлениям, разрушению металла предшествует образование в его структуре дефектов в виде микро- и макронарушений целостности. Микроскопические поры и трещины формируются в процессе пластической деформации твердых тел или вследствие технологических особенностей их получения. Как правило, увеличение деформационной пористости ведет к деградации физико-механических характеристик материалов [1].

Обработка металлов методами интенсивной пластической деформации (ИПД) является одним из наиболее перспективных методов получения мате-

риалов с высокими физическими и механическими свойствами [2]. Именно немонотонная деформация приводит к формированию преимущественно зеренной структуры, что наделяет такие нанозернистые материалы особенно высокими свойствами [3].

Особое внимание уделяется вопросам формирования прочностных свойств и влияния на эти процессы различных дефектов кристаллического строения, размера зерна и микропор. Известно, что образование микродефектов в процессе деформации приводит не только к снижению конструкционной прочности и надежности металла, но и изменяет его физические свойства, в частности плотность. В работе [4] был оценен вклад кристаллических дефектов и напряжений в изменение плотности при деформации. Было показано, что уменьшение плотности материала за счет увеличения плотности дислокаций, микронапряжений кристаллической решетки и концентрации точечных дефектов весьма незначительно и не превышает 10^{-6} – 10^{-13} г/см³. На основании этого был сделан вывод, что существенное изменение плотности может быть только результатом образования микропор и микротрещин.

В чистых металлах и ряде сплавов ИПД обеспечивают формирование ультрамелкозернистой структуры с размерами зерен до 100–200 нм. Однако сформировавшиеся зерна имеют специфическую субструктуру с присутствием зернограницных и решеточных дислокаций и наличием больших упругих искажений кристаллической решетки. Высокая плотность дислокаций в границах зерен и искажения кристаллической решетки за счет дальнедействующих упругих напряжений могут привести к дефектности материала, а именно к образованию микропор и микротрещин, которые способствуют разрушению материала [2]. Поэтому исследования влияния ИПД на дефектность структуры и свойства материалов являются актуальными.

Ранее авторами [5] были исследованы зеренная и дефектная структуры, а также свойства меди М06 после деформации РКУП в дробном режиме с эквивалентной разовой степенью $e = 0.2$ и суммарной $e = 1.6$. В данной статье расширен диапазон технологических условий и режимов процесса РКУП.

Цель настоящей работы заключалась в изучении эволюции зеренной и дефектной структур (микропоры) меди в результате деформации разными схемами РКУП и влияния этих структурных характеристик на механические и физические свойства материала. Была выбрана схема РКУП, позволяющая деформировать материал при сдвиговой деформации в дробном режиме ($e < 1$), но с большой суммарной степенью деформации, а для сравнения представлена традиционная схема РКУП ($e \geq 1$).

Материал и методы исследования

Исходным материалом служили промышленные горячепрессованные прутки меди М06 диаметром 50 мм, которые вначале прессовали до диаметра 30 мм, а затем часть из них с диаметра 30 мм – до диаметра 20 мм, а часть – до диаметра 16 мм. Полученные заготовки отжигали при темпера-

туре 600°C в течение 2 h. Деформационную обработку образцов в исходном состоянии (после отжига) осуществляли методом РКУП при комнатной температуре по двум схемам, представленным на рис. 1.

Для деформации с углом пересечения каналов $\theta = 90^{\circ}$ (рис. 1,а) заготовки диаметром 20 mm проходили через каналы деформирующей матрицы от 1 до 6 раз с поворотом заготовки на 180° . Разовая эквивалентная деформация за один цикл прессования $e = 1$.

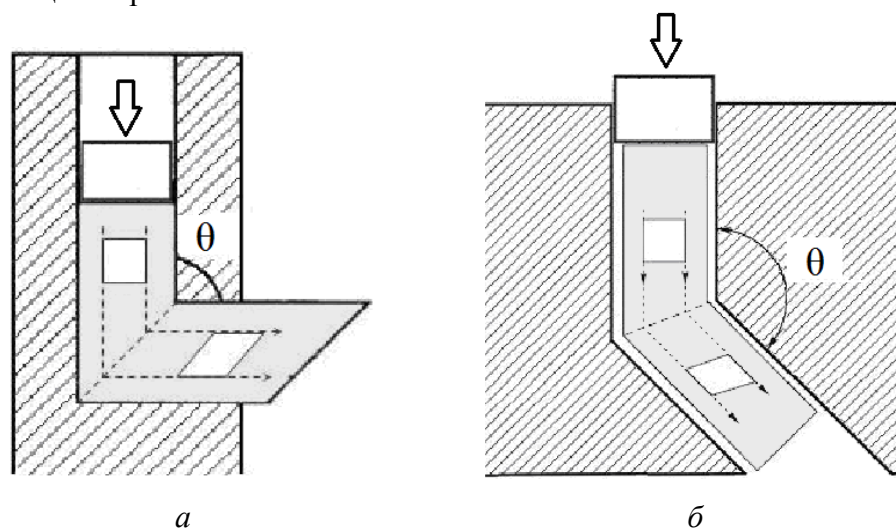


Рис. 1. Схемы равноканального углового прессования: а – $\theta = 90^{\circ}$, б – 160°

На рис. 1,б показана схема деформации РКУП с углом пересечения каналов $\theta = 160^{\circ}$. Заготовки диаметром 16 mm проходили через каналы деформирующей матрицы от 5 до 30 раз с поворотом заготовки на 180° . Разовая эквивалентная деформация за один цикл прессования $e = 0.2$. Накопленная суммарная деформация образцов в первом и во втором случаях была одинакова.

Прессование заготовок осуществляли на лабораторной установке, смонтированной на базе гидравлического пресса усилием 250 tf. Деформирующий блок представляет собой набор толстостенных поворотных втулок с пересекающимися каналами одинакового диаметра. Втулки размещены в корпусной обойме.

Термическую обработку образцов проводили в лабораторной печи СНОЛ-7.2/1100.

Дефектную структуру (микропоры, микротрещины), свойства образцов в исходном состоянии и после деформации анализировали методами дюротрических (твердомер Виккерса HV-5), волюметрических (весы SHIMADZU) исследований, растровой электронной микроскопии (JEOL JSM-6490), а также электронной микроскопии на просвет (JEM-200A) и рентгеноструктурного анализа (установка ДРОН-3) с использованием K_{α} - и K_{β} -излучений.

Сканирование поверхности поперечного шлифа медных прутков диаметром 20 и 16 mm проводили с помощью растровой электронной микроскопии в ВЕС-режиме с шагом 1 mm.

Расчет параметров тонкой структуры (величины ОКР, деформации кристаллической решетки, плотности дислокаций) осуществляли по усовершенствованному методу аппроксимации, используя пару плоскостей (111)–(220). В качестве эталона применяли медь М0б, отожженную при 600°C.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований влияния различных схем РКУП на деформационную пористость и физико-механические свойства меди были детально изучены закономерности развития микронесплошностей с увеличением степени накопленной деформации для этих схем.

Таблица

Физико-механические свойства меди после разных видов обработки

Вид обработки	Степень деформации	Угол пересечения каналов θ , deg			
		160		90	
		плотность ρ , g/cm ³	твёрдость HV, МПа	плотность ρ , g/cm ³	твёрдость HV, МПа
Отжиг 600°C, 2 h	0	8.9146	490	8.9146	490
РКУП	1	8.9145	1152	8.9143	1028
	2	8.9144	1264	8.9142	1282
	4	8.9126	1252	8.9110	1321
	6	8.9091	1272	8.9039	1348

Сравнительный анализ структуры и физико-механических свойств образцов, полученных по двум схемам РКУП (таблица), показал, что плотность образцов при сдвиговой деформации в дробном режиме ($e = 0.2$) немного выше. Твёрдость, как и для других методов ИПД [6], интенсивно повышается в пределах деформации до $\Sigma e \sim 2$, а далее меняется незначительно.

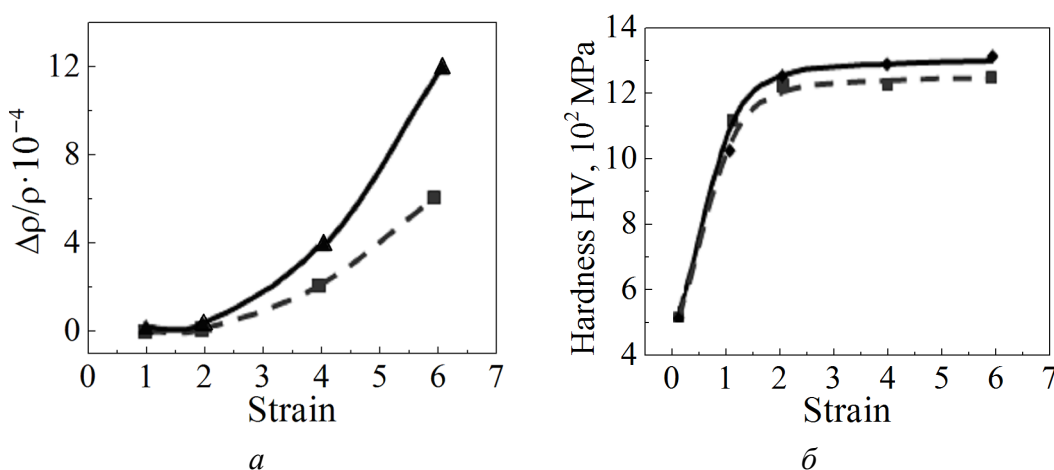


Рис. 2. Влияние степени деформации РКУП на деформационную пористость (а) и твердость (б) меди: ▲ – $\theta = 90^\circ$, ■ – 160°

На рис. 2 представлены графики зависимости деформационного разуплотнения и твердости от степени деформации.

Необходимо отметить, что в эволюции структуры меди при РКУП с дробным режимом деформации в меньшей степени отмечаются особенности, связанные с активизацией процессов возврата и рекристаллизации, обусловленные большими пластическими деформациями и фактором внешнего трения. Небольшие разовые интенсивности деформации и соответствующий им малый эффект разогрева образцов при деформации не способствуют процессам динамического возврата и рекристаллизации [7].

Следовательно, причиной такого поведения прочностных свойств является дефектная структура материала (микропоры, микротрещины), которая образуется в процессе ИПД.

Представляют интерес данные по твердости при немонотонной деформации с очень малой амплитудой, равной 0.2 по Мизесу. Эта величина находится вблизи порога фрагментации, что должно бы существенно снизить твердость. Но эксперимент показал, что этого не происходит. Твердость снизилась менее чем на 10% по сравнению с этой характеристикой после традиционного РКУП. Подобный эффект наблюдали авторы работы [8], но в других условиях обработки.

Установлено, что при деформации РКУП с большой суммарной степенью, но в дробном режиме ($e < 1$), деформационная пористость меди меньше по сравнению с традиционным РКУП ($e \geq 1$).

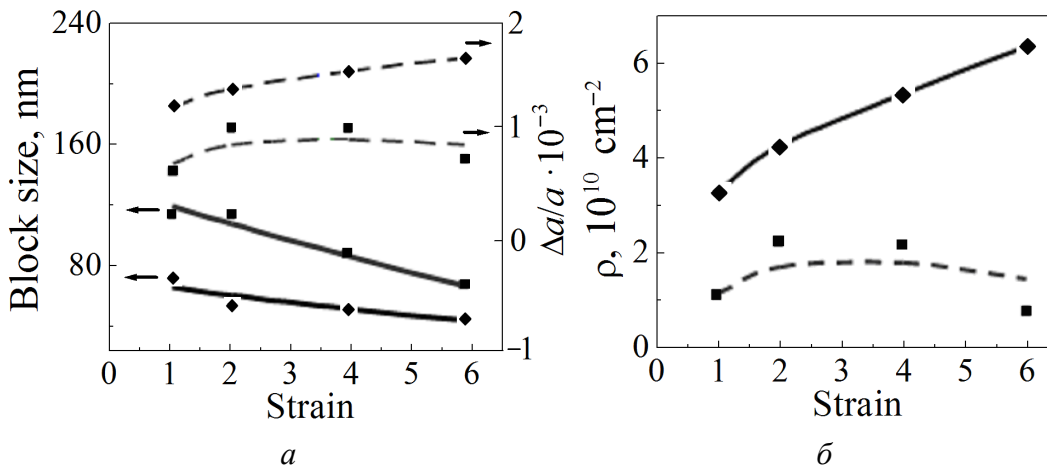


Рис. 3. Данные рентгеноструктурного анализа для меди, деформированной РКУП при разных режимах: \blacklozenge – $\theta = 90^\circ$, \blacksquare – 160°

Рентгеноструктурные исследования тонкой структуры показали, что в данном случае (при больших накопленных деформациях) уровень микродеформации решетки меди и плотность хаотично расположенных дислокаций меньше на порядок по сравнению с этими показателями для образцов после традиционного РКУП (рис. 3), а значит, и уровень разуплотнения решетки меньше. В то же время наблюдается интенсивное измельчение зеренной

структуры, а существенную роль в формировании дефектной структуры играют размеры структурной гетерогенности (блоков, зерен). Получение мелкозернистой структуры и, следовательно, большой протяженности границ зерен сдерживает образование новых несплошностей и тормозит развитие уже существующих [1].

По результатам исследований с помощью программы «Статистика» построены гистограммы распределения пор по размерам для обеих схем РКУП (рис. 4). Размеры пор (площадь) определяли по снимкам поперечного сечения прутка меди М0б, полученным с помощью растровой электронной микроскопии, используя программу «Image Tool». Подавляющее большинство пор имеют размеры десятых и сотых долей микрона, что совпадает с размерами блоков мозаики по данным рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии на просвет.

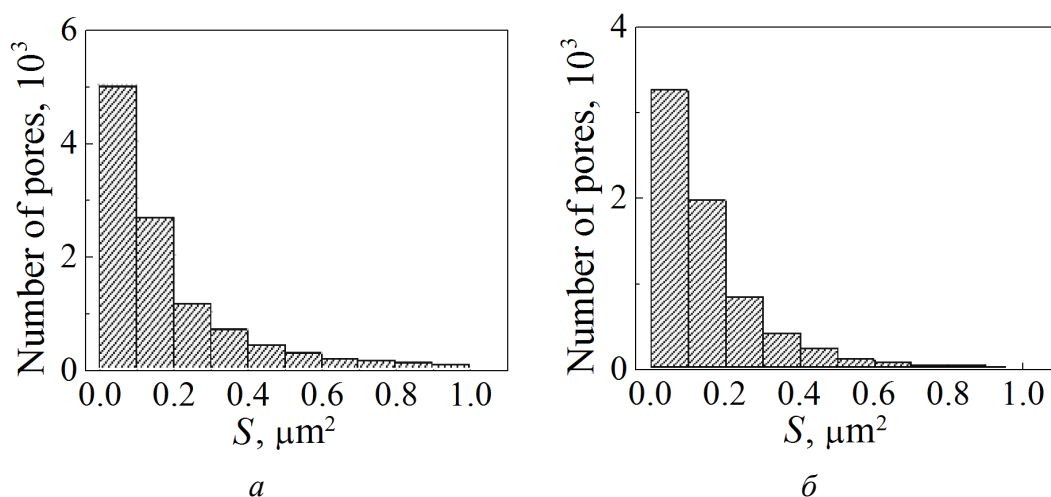


Рис. 4. Гистограммы распределения пор по размерам при РКУП: *a* – $\theta = 90^\circ$, *б* – 160°

На рис. 5 показаны снимки электронной микроскопии образца, деформированного в дробном режиме ($e < 1$) со степенью деформации $\Sigma e = 2$, которые иллюстрируют зародышевую пору, ее структурное расположение и превращение в микротрещину в процессе деформации сдвигом.

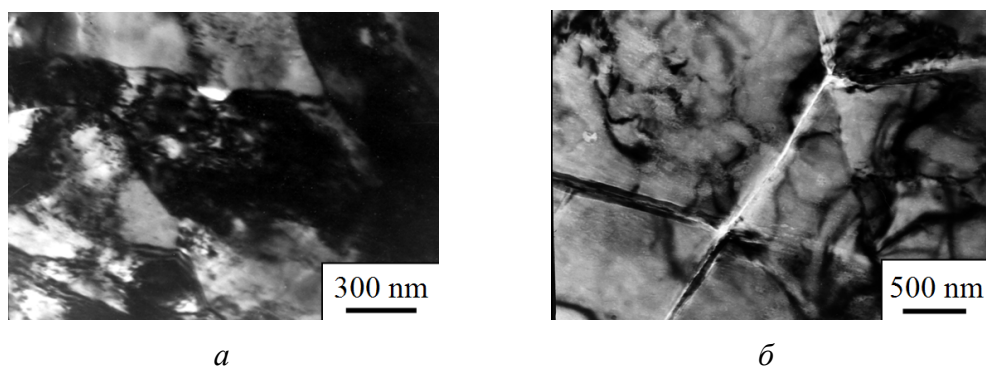


Рис. 5. ПЭМ-изображения формирования при РКУП микропор (*a*) и микротрещин (*б*)

По мнению авторов многочисленных работ, в чистом, не содержащем инородных включений материале зародышевые микропоры и микротрещины располагаются в участках хорошо развитой фрагментированной структуры и только в стыках фрагментов. В процессе деформации микротрещины на начальном этапе своего роста распространяются вдоль границ фрагментов [9]. Наши исследования подтверждают данные выводы.

Заключение

Анализ полученных экспериментальных данных по структуре, упрочнению и деформационной пористости медных образцов в результате применения различных схем РКУП показал, что с точки зрения уменьшения дефектности материала более предпочтительной является схема деформации меди в дробном режиме ($e < 1$).

1. П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин, Поры в твердом теле, Энергоатомиздат, Москва (1990).
2. Р.З. Валиев, И.В. Александров, Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, Логос, Москва (2000).
3. А.Н. Тюменцев, И.А. Дитенберг, Ю.П. Пинжин, А.Д. Коротаев, Р.З. Валиев, ФММ **96**, № 4, 33 (2003).
4. Ю.В. Баранов, Г.Ж. Сахвадзе, В.В. Столяров, Вестник научно-технического развития № 10(38), 12 (2010).
5. Л.Ф. Сенникова, В.М. Ткаченко, В.В. Бурховецкий, А.П. Борзенко, ФТВД **27**, № 2, 124 (2017).
6. Л.Ф. Сенникова, А.А. Давиденко, В.В. Бурховецкий, Т.А. Закорецкая, Вопросы материаловедения № 1(85), 22 (2016).
7. Н.И. Матросов, Л.Ф. Сенникова, Е.А. Павловская, А.Б. Дугадко, Э.А. Медведская, Б.А. Шевченко, Металлофиз. новейшие технол. **25**, 1321 (2003).
8. С. Chen, Ya. Beygelzimer, L.S. Toth, Yu. Estrin, R. Kulagin, J. Eng. Mater. Tech. **138**, 031010 (2016).
9. В.В. Рыбин, Большие пластические деформации и разрушение металлов, Металлургия, Москва (1986).

*L.F. Sennikova, V.M. Tkachenko, A.N. Gangalo, V.V. Burkhovetskii,
G.K. Volkova, V.A. Glazunova*

ESTIMATE OF DEFORMATION POROSITY AND PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COPPER M0b AFTER EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING BY DIFFERENT SCHEMES

The results of study of evolution of grain and defect structures of copper M0b (99.99%) in the course of deformation by different schemes of equal-channel angular pressing (ECAP) and the effect of the structure characteristics on mechanical and physical properties of the material are presented. Deformation degree dependence of deformation soften-

ing and hardness of copper is demonstrated for different schemes of ECAP. It is found that when ECAP deformation mode is fractional with high total degree of deformation ($e < 1$), deformational porosity of copper is less of that produced by the traditional ECAP ($e \geq 1$).

Keywords: copper, equal-channel angular pressing, structure, hardness, deformational porosity, density, micropores, microcracks, softening

Fig. 1. Schemes of equal-channel angular pressing: $a - \theta = 90^\circ$, $\bar{\sigma} - 160^\circ$

Fig. 2. Effect of ECAP strain on deformation porosity (a) and hardness of copper ($\bar{\sigma}$): $\blacktriangle - \theta = 90^\circ$, $\blacksquare - 160^\circ$

Fig. 3. X-ray structure analysis of ECAP-deformed copper in different modes: $\blacklozenge - \theta = 90^\circ$, $\blacksquare - 160^\circ$

Fig. 4. Histograms of pore distribution over the size in the course of ECAP: $a - \theta = 90^\circ$, $\bar{\sigma} - 160^\circ$

Fig. 5. TEM images of formation of micropores (a) and microcracks ($\bar{\sigma}$) in the course of ECAP