

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

Л.Ф. Сенникова, В.М. Ткаченко, В.В. Бурховецкий, А.П. Борзенко

ВЛИЯНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ В ДРОБНОМ РЕЖИМЕ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕДИ М06

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

Статья поступила в редакцию 1 марта 2017 года

Изучены поведение материала, изменения его структурного состояния и свойства при сдвиговой деформации в дробном режиме ($e < 1$) в результате применения равноканального углового прессования (РКУП). Показано, что пластическая деформация РКУП с суммарной степенью $\Sigma e \leq 1.6$ приводит к измельчению зеренной структуры и увеличению твердости меди почти в два раза. Получены данные о деформационной пористости меди в результате РКУП и построены гистограммы распределения пор по размерам.

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

Введение

Обработка металлов методами интенсивной пластической деформации (ИПД) является одним из наиболее перспективных методов получения материалов с высокими физическими и механическими свойствами. Особое внимание уделяется вопросам формирования прочностных свойств и влияния на эти процессы различных дефектов кристаллического строения и размера зерна. В настоящее время учеными создаются основы для практической разработки методов пластической деформации с целью повышения механических свойств и ресурса долговечности для широкого круга материалов за счет снижения микропористости.

Характерными особенностями нано- и субмикроструктурных материалов являются наличие высокой плотности дефектов кристаллического строения в объеме зерен и сильно неравновесное состояние их границ. В работах [1,2] для аттестации дефектной структуры материалов, полученных при воздействии ИПД, использованы специальные методы электронно-микроскопического анализа, с помощью которых были изучены субмикроструктурный никель и сплавы на основе Ni_3Al .

Авторами [3] исследована СМК-медь (99.98%), полученная методами РКУП и кручения в наковальнях Бриджмена. Изучены характеристики субзеренной структуры, объема и границ зерен, оценены локальные внутренние

напряжения, а также проведено обсуждение возможных механизмов переориентации кристаллической решетки в процессе ИПД. Наблюдаются высокие значения кривизны кристаллической решетки и плотности дислокаций, что служит источниками высоких внутренних напряжений и способствует возникновению микропор и микротрещин в материале.

В работе [4] изучена эволюция структуры меди (99.8%) при ИПД новым методом динамического канально-углового прессования и исследованы механические свойства полученных субмикро- и нанокристаллических структур [4]. Установлено, что при 2–4-кратном прессовании зерна (субзерна) меди измельчаются до 350 nm, при этом твердость повышается в 2–2.2 раза, а прочность – в 1.4 раза при сохранении пластичности.

В последнее время в проблеме прочности существенное значение придается не только сдвиговой (дислокационной), но и ротационной (дисклинационной) деформации, также являющейся механизмом локализации повышенных напряжений, разрядка которых ведет к зарождению несплошностей. Характерными участками с повышенными напряжениями могут быть тройные стыки и границы фрагментов (блоков), границы зерен и т.д. [5].

Прочностные аспекты, связанные с накоплением, развитием и слиянием микронесплошностей, имеют принципиальное значение как для создания физических основ разрушения твердых тел, так и для разработки практических путей прогнозирования и повышения их долговечности.

Авторами работы [6] исследованы возможности залечивания микродефектов методами импульсных технологий обработки наноструктурных материалов, в частности лазерной ударной волной и импульсным током применительно к алюминиевым и титановым сплавам, полученным методами ИПД. Так, в наноструктурном сплаве $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ наступает почти полное восстановление его плотности.

Многочисленные исследования по изучению структуры материалов, подвергшихся ИПД, констатируют, что наблюдается сложное сочетание дефектных структур различных уровней – точечные дефекты, дислокации, границы зерен и трехмерные дефекты кристаллической решетки в виде микропор и микротрещин. Однако информация эта довольно противоречива и неоднозначна.

Предполагается, что накопление больших значений суммарной деформации с малыми разовыми степенями вносит меньше деформационных повреждений, чем в случае применения больших разовых деформаций, что позволяет повысить прочностные свойства материала. Поэтому нами была выбрана схема РКУП, позволяющая деформировать материал при сдвиговой деформации в дробном режиме ($e < 1$).

Цель настоящей работы заключалась в изучении эволюции зеренной и дефектной структур (микропор) меди в результате деформации РКУП в дробном режиме и влияния этих структурных характеристик на механические свойства материала. Проведены исследования деформационной порис-

тости, дана реальная оценка ее количества и распределения по размерам, что является актуальной задачей.

Результаты работы внесут свой вклад в понимание роли таких дефектов кристаллической решетки, как микропоры, в формировании прочностных свойств материалов.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного материала использовали промышленные горячепрессованные прутки из бескислородной меди марки М06 (99.99%) диаметром 50 mm. Предварительную деформационную обработку исходного материала осуществляли гидроэкструзией до диаметра 18 mm, затем заготовку обтачивали до диаметра 15 mm с последующим отжигом при 600°C в течение 2 h. Полученные образцы исследовали после 8 проходов РКУП с суммарной деформацией $\Sigma e = 1.6$. Накопление деформации осуществляли повторением циклов в интервале от 1 до 8. Разовая эквивалентная деформация за один цикл прессования $e = 0.2$.

Схема деформации показана на рис. 1. Прессование заготовок осуществляли на лабораторной установке, смонтированной на базе гидравлического прессы усилием 250 tf с использованием деформирующих блоков с рабочими каналами диаметром 15 mm. Деформирующий блок представляет собой набор толстостенных поворотных втулок с пересекающимися каналами одинакового диаметра. Втулки размещены в корпусной обойме. Угол пересечения втулок в данном случае $\phi = 160^\circ$. 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 дюрOMETрических (твердомер Вика Vickers HV-5) и волноМетрических (весы SHIMADZU) исследований, а также растровой электронной микроскопии (JEOL JSM-6490). Сканирование поверхности поперечного шлифа медных прутков диаметром 14 mm, проводили с помощью растровой электронной микроскопии в ВЕС-режиме с шагом 1 mm. Зеренную структуру исследовали методом оптической микроскопии (микроскоп ZEISS, Axiovert 40 MAT).

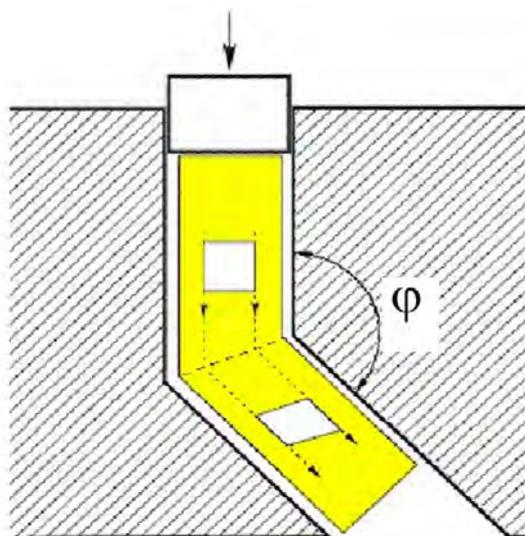


Рис. 1. Схема деформационной обработки заготовок методом РКУП

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показана микроструктура медного образца диаметром 14 mm в исходном состоянии (после отжига при 600°C, 2 h) и после 8 проходов РКУП с накопленной деформацией $\Sigma e = 1.6$. В исходном состоянии структура представляет собой рекристаллизованные зерна размером $\sim 130 \mu\text{m}$. Наблюдается структурная неоднородность по величине зерна и наличие множества двойников отжига. Твердость образца по Виккерсу 630 МПа.

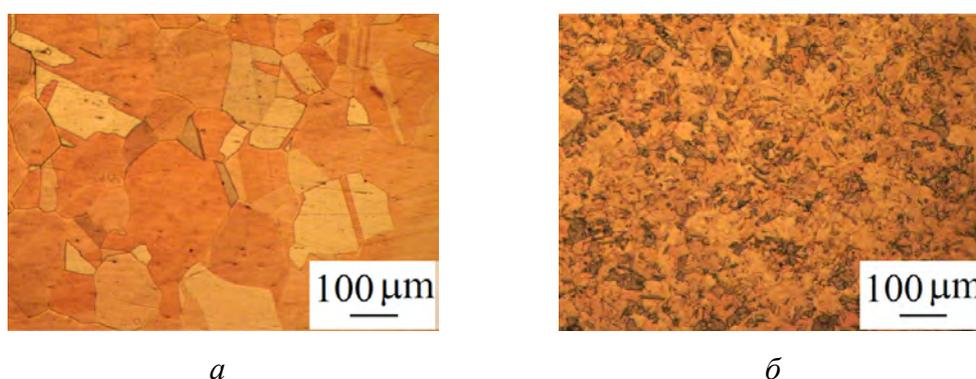


Рис. 2. Оптическая микроскопия поперечного сечения прутка меди М0б диаметром 14 mm: *a* – после отжига (600°C, 2 h); *б* – после 8 проходов РКУП ($\Sigma e = 1.6$)

В процессе деформации РКУП происходит измельчение структурных составляющих, и структура приобретает мелкозернистое строение. В нашем случае после 8 проходов деформации РКУП ($\Sigma e = 1.6$) средняя величина зерна составляет $\sim 40 \mu\text{m}$, а твердость увеличивается до 1050 МПа.

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, что позволит в процессе РКУП получить субмикроструктурную структуру материала [7].

Известно, что образование микродефектов в процессе деформации не только приводит к снижению конструкционной прочности и надежности металла, но и изменяет его физические свойства, в частности плотность. В работе [6] был оценен вклад кристаллических дефектов и напряжений в изменение плотности при деформации. Было показано, что уменьшение плотности материала за счет увеличения плотности дислокаций не превышает 10^{-6} g/cm^3 , вклад в изменение плотности от увеличения концентрации вакансий составляет 10^{-13} g/cm^3 , от микронапряжений – 10^{-6} g/cm^3 . Поэтому был сделан вывод, что существенное изменение плотности может быть результатом образования только микропор и микротрещин [6].

В нашем случае изменение плотности меди после деформации с суммарной степенью $\Sigma e = 1.6$ по отношению к образцу после отжига составляет $\sim 0.1\%$. Плотность определяли методом гидростатического взвешивания. В исходном состоянии она была на уровне $\rho = 8.86427 \text{ g/cm}^3$. После деформации (8 проходов РКУП) плотность уменьшилась до $\rho = 8.8556 \text{ g/cm}^3$.

Методом растровой электронной микроскопии получены данные о деформационной пористости меди в результате РКУП и построены гистограммы распределения пор по размерам (рис. 3). Размеры пор (площадь) определяли по снимкам поперечного сечения прутка меди М0б диаметром 14 mm, полученным методом растровой электронной микроскопии, используя программу «Image Tool». Гистограммы строили с помощью программы «Статистика». Обнаружено, что с увеличением степени деформации до $\Sigma e = 1.6$ количество микропор незначительно меняется по отношению к отожженному состоянию материала. Наблюдаются измельчение зеренной структуры и рост твердости в несколько раз. А, как известно, мелкозернистая структура и большая протяженность границ зерен сдерживают образование новых несплошностей и тормозят развитие уже существующих [5]. Большинство пор имеют размеры десятых и сотых долей микрона.

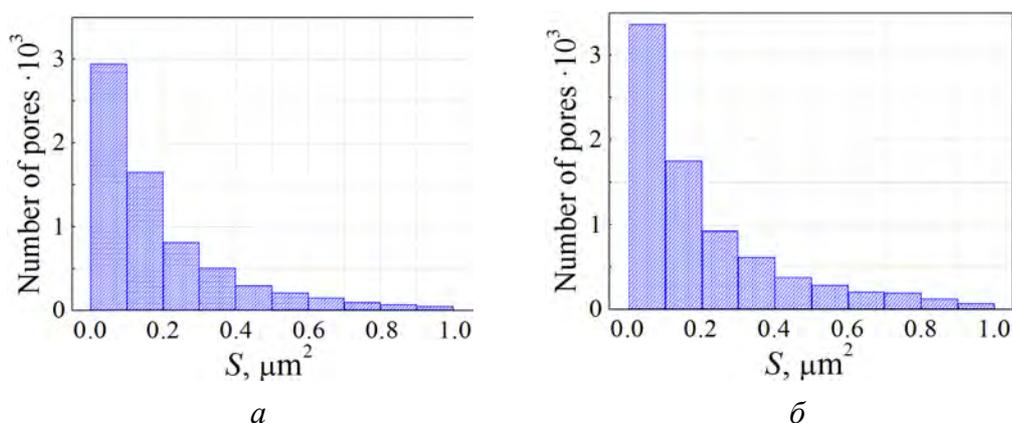


Рис. 3. Гистограммы распределения микропор по размерам (площади) для меди М0б: *a* – после отжига (600°C, 2 h); *б* – после 8 проходов РКУП ($\Sigma e = 1.6$)

Анализ экспериментальных данных показал, что для получения субмикрорекристаллической структуры, а следовательно, уменьшения деформационной пористости и повышения прочностных свойств материала, необходимо увеличивать суммарную деформацию.

Выводы

На основании проведенных экспериментов изучена эволюция зеренной структуры и механических свойств медных образцов под влиянием деформации сдвигом в дробном режиме ($e < 1$). Показано измельчение зеренной структуры и увеличение твердости по Виккерсу в процессе накопления де-

формации РКУП. Исследована деформационная пористость меди в результате деформации РКУП с эквивалентной разовой степенью $e = 0.2$ и построены гистограммы распределения пор по размерам. Сделан вывод о необходимости продолжения исследования технологических условий и режимов процесса РКУП с целью повышения механических свойств материала за счет уменьшения деформационной пористости.

1. А.Н. Тюменцев, Ю.П. Пинжин, А.Д. Коротаев, М.В. Третьяк, Р.К. Исламгалиев, Р.З. Валиев, ФММ **86**, № 6, 110 (1998).
2. А.Н. Тюменцев, М.В. Третьяк, Ю.П. Пинжин, А.Д. Коротаев, Р.З. Валиев, Р.К. Исламгалиев, А.В. Корзников, ФММ **90**, № 5, 44 (2000).
3. А.Н. Тюменцев, И.А. Дитенберг, Ю.П. Пинжин, А.Д. Коротаев, Р.З. Валиев, ФММ **96**, № 4, 33 (2003).
4. И.В. Хомская, Е.В. Шорохов, В.И. Зельдович, А.Е. Хейфец, Н.Ю. Фролова, П.А. Насонов, А.А. Ушаков, И.Н. Жгилев, ФММ **111**, 639 (2011).
5. П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин, Поры в твердом теле, Энергоатомиздат, Москва (1990).
6. Ю.В. Баранов, Г.Ж. Сахвадзе, В.В. Столяров, Вестник научно-технического развития № 10 (38), 12 (2010).
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).

L.F. Sennikova, V.M. Tkatchenko, V.V. Burkhovetskii, A.P. Borzenko

EFFECT OF EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING IN FRACTIONAL MODE ON THE STRUCTURE AND THE PROPERTIES OF COPPER M06

The behavior of the material, evolution of the structure state and the properties are studied under shear deformation in fractional mode ($e < 1$) provided by the equal-channel angular pressing (ECAP) applied. It is shown that plastic deformation by ECAP characterized by the total degree $\Sigma e \leq 1.6$ results in fragmentation of the grain structure and double hardness of copper. The data about the ECAP-generated deformation porosity of copper are and histograms of pore size distribution are presented.

Keywords: copper, equal-channel angular pressing, structure, hardness, deformation porosity, density

Fig. 1. Scheme of ECAP deformation of the billet

Fig. 2. Optic microscopy of the cross-section of a copper rod (M06) of 14 mm in diameter: *a* – after anneal (600°C, 2 h); *b* – after 8 ECAP passes ($\Sigma e = 1.6$)

Fig. 3. Histograms of size distribution of micropores (by area) in copper M06: *a* – after anneal (600°C, 2 h); *b* – after 8 ECAP passes ($\Sigma e = 1.6$)