

PACS: 61.66.-f, 62.20.-x

Е.Г. Пашинская¹, С.Г. Сынков¹, В.М. Ткаченко¹,
А.С. Домарева¹, Ю.А. Юдина²

ЭВОЛЮЦИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МЕДИ
ПРИ МНОГОПЕРЕХОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ
ПУТЕМ ВИНТОВОГО ПРЕССОВАНИЯ И ПРОКАТКИ

¹Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

²Донецкий национальный технический университет
83000, г. Донецк, ул. Артема, 58

Статья поступила в редакцию 20 марта 2003 года

Проведено изучение взаимосвязи схемы комбинированной пластической деформации при двухкомпонентном нагружении с субмикроструктурными изменениями меди. Осуществлен сравнительный анализ двух типов комбинированной деформации: винтовое прессование (ВП) + прокатка и прокатка + ВП. Показано, что при первой схеме нагружения процессы трансформации структуры под нагрузкой протекают значительно интенсивнее, чем при второй.

В работах [1,2] показано, что наиболее эффективным методом получения субмикроструктурной (СМК) структуры является деформирование материала, включающее одновременно осевой и крутящий компоненты деформации. Предложенный в ДонФТИ им. А.А. Галкина метод ВП [3] позволяет достичь больших пластических деформаций на массивных образцах и сформировать характерную СМК-структуру. В работах [4,5] показано, что степени деформации ($\epsilon \approx 2$), накопленной методом ВП, достаточно для начала и развития процесса трансформации зеренной структуры в субмикроструктурную, однородную по всему сечению.

В производственной практике при получении однородной микроструктурной структуры в крупных заготовках предпочтение отдается, как правило, многопереходному разнонаправленному деформированию материала. Степень деформации, необходимая для трансформации микроструктуры, определяется не только температурно-скоростными режимами обработки, но и схемой нагружения. Поэтому представляет интерес проследить поведение СМК-структуры при комбинированной деформации. Настоящая работа посвящена изучению взаимосвязи СМК-изменений меди с особенностями комбинированной (ВП + прокатка и прокатка + ВП) деформации при двухкомпонентном нагружении.

Использовали две группы образцов, одну из которых подвергали ВП и последующей прокатке, другую, наоборот, – прокатке и ВП. В качестве модельного материала для апробирования методов комбинированной деформации применяли медь М1. Контроль свойств осуществляли методами измерения плотности, твердости и микротвердости; исследование структуры образцов деформированной меди проводили на микрошлифах; количественный анализ микроструктур выполняли по фотографиям; статистическую обработку полученных данных осуществляли с привлечением программы Statistika 5.5.

Для изучения перестройки структуры меди в процессе деформации исследовали образцы в исходном состоянии (отжиг: $T = 500^{\circ}\text{C}$; $\tau = 1$ ч; $e = 0$); после одного прохода ВП ($e = 2,7$); после комбинированной пластической деформации, выполненной двумя способами. В первом случае комбинированная деформация (КД1) включала ВП + прокатку ($e = 2,7 + 1,36 = 4,06$), причем ось прокатки совпадала с осью ВП. Во втором случае (КД2) схема деформации состояла из прокатки + ВП ($e = 1,3 + 2,7 = 4,0$). Необходимо отметить, что впоследствии эти образцы подвергли еще двум циклам ВП ($e = 1,3 + 4,7 = 6,0$ и $e = 1,3 + 8,7 = 10,0$). Для оценки развития анизотропии при деформации структуру и свойства образцов исследовали в перпендикулярном и параллельном сечениях.

В исходном состоянии (до КД1) образцы имели плотность $8,90 \text{ г/см}^3$. Дальнейшая их обработка винтовым прессованием привела к уменьшению плотности, что, вероятно, связано с формированием вакансий.

Применение ВП при КД2 привело к увеличению плотности (рис. 1), что может быть связано с уменьшением количества пор, образовавшихся в литом состоянии, под воздействием прокатки и ВП. После достижения $e = 4,0$ наблюдается некоторое уменьшение плотности, при дальнейшем накоплении деформации до $e = 10,0$ плотность практически не изменяется. Небольшая тенденция к росту может быть связана со стоком вакансий в процессе перестройки структуры во время деформации.

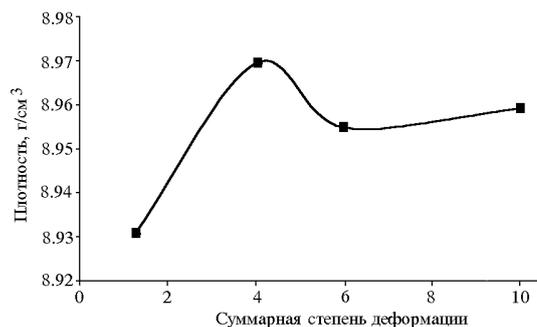
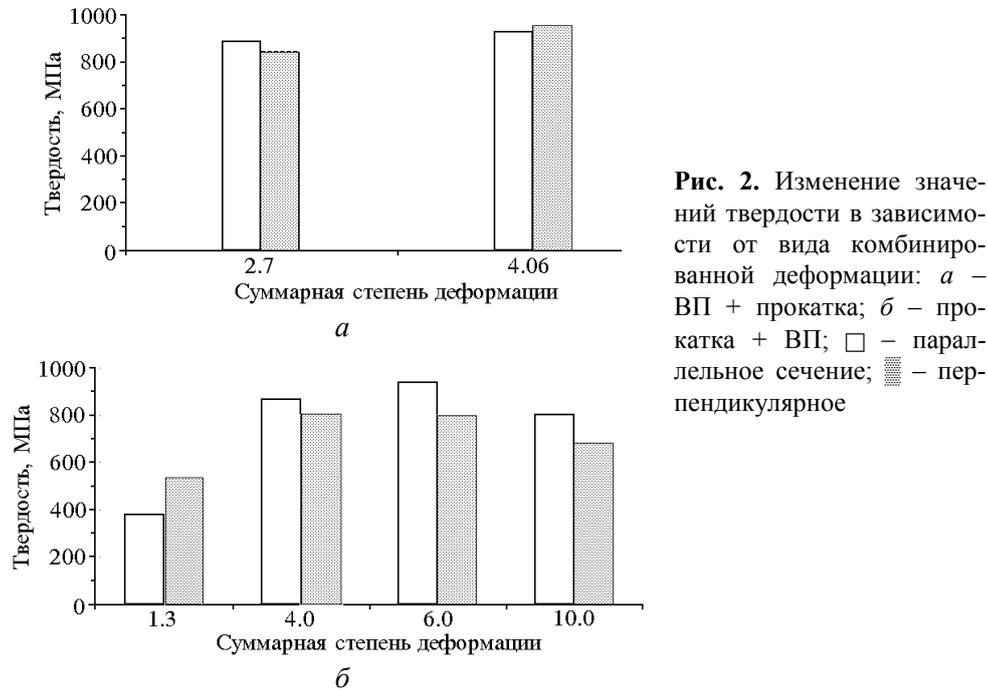


Рис. 1. Изменение плотности меди после КД2

В случае КД1 образцы меди после ВП имели практически одинаковую твердость (рис. 2,а) и микротвердость (рис. 3,а) в продольном и поперечном сечениях относительно оси ВП. Дальнейшая прокатка привела к значительному увеличению последней в обоих сечениях. Такое поведение твердости и микротвердости не является типичным, поскольку обычно после одноосевой деформации отмечается анизотропия свойств и структуры.

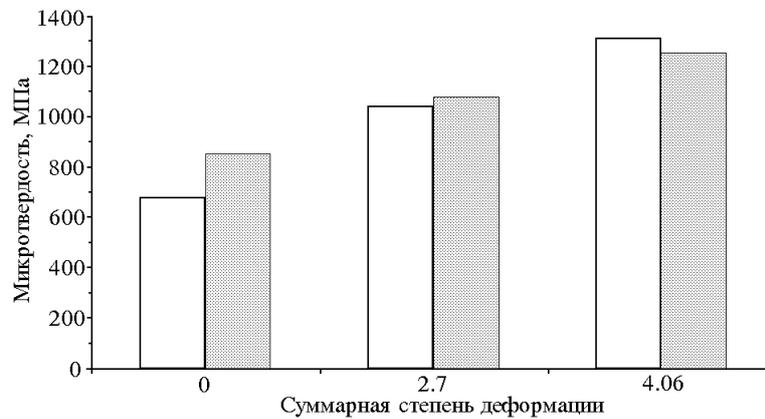


При КД2 диаграммы твердости (рис. 2,б) и микротвердости (рис. 3,б) имеют качественно одинаковые закономерности: в результате прокатки медь в сечении, перпендикулярном оси прокатки, обладала большей твердостью и микротвердостью, чем в параллельном. Дальнейшее ВП привело к тому, что в перпендикулярном сечении твердость и микротвердость имели значения меньшие, чем в параллельном. Такое изменение соотношения твердости в разных сечениях может объясняться изменением текстуры прокатки при дальнейшей обработке ВП. Металлографические исследования показали, что наблюдается изменение направления вытянутости зерен относительно оси деформации: после ВП зерна ориентированы под углом к оси. При ВП по схеме КД2 наблюдается общее увеличение твердости и микротвердости по сравнению с предшествующей прокаткой. ВП до $e = 10,0$ привело к некоторому уменьшению твердости, что связано с развитием процесса рекристаллизации, так как плотность увеличивается, а микротвердость уменьшается.

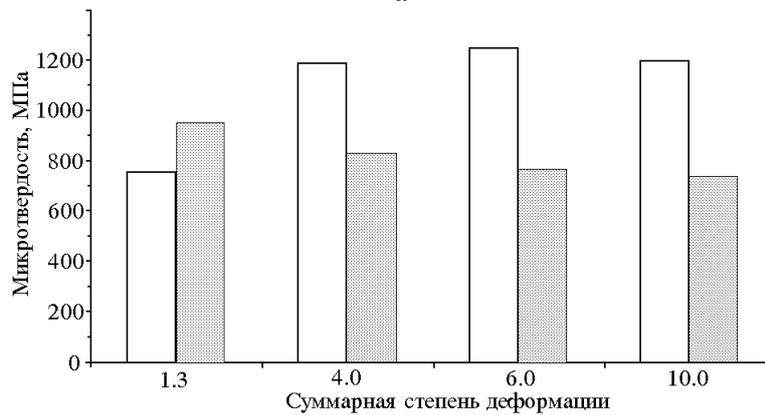
Сравнивая значения микротвердости после разных схем деформации, можно заметить, что для КД1 и КД2 характерно общее увеличение твердости и микротвердости. Однако при КД1 для всех сечений микротвердость выше на 7–9%, чем при КД2, несмотря на то, что суммарная степень деформации при КД2 накапливается значительно большая, чем при КД1 (10,0 и 4,06 соответственно).

Статистическая обработка результатов измерений микротвердости показала, что для всех образцов в обоих сечениях значения распределены близко к нормальному закону, т.е. в выборке одинаково часто встречаются результаты больше и меньше среднего значения. Относительную остроконечность и

сглаженность распределения по сравнению с нормальным законом характеризует эксцесс, значение которого изменяется в пределах 1,2–4,1. Эксцесс 4,1 соответствует КД2 в перпендикулярном сечении после суммарной деформации $e = 6,0$ и свидетельствует о некотором разбросе данных, связанном с увеличением размера зерен вследствие рекристаллизации в процессе деформации (рис. 4). Коэффициент асимметрии (0–1,8) характеризует долготу функции частотного распределения и показывает, что для всех образцов оно вытянуто вправо относительно среднего значения (т.е. преобладающее количество измерений имеют значения, превышающие среднюю величину). Стандартное отклонение измерений колеблется в пределах 3,7–8,5 (таблица). В целом увеличение степени деформации уменьшает стандартное отклонение, что свидетельствует об установившихся процессах и более равномерной деформации.



a



б

Рис. 3. Изменение значений микротвердости в зависимости от вида комбинированной деформации: *a* – ВП + прокатка; *б* – прокатка + ВП; □ – параллельное сечение; ▨ – перпендикулярное

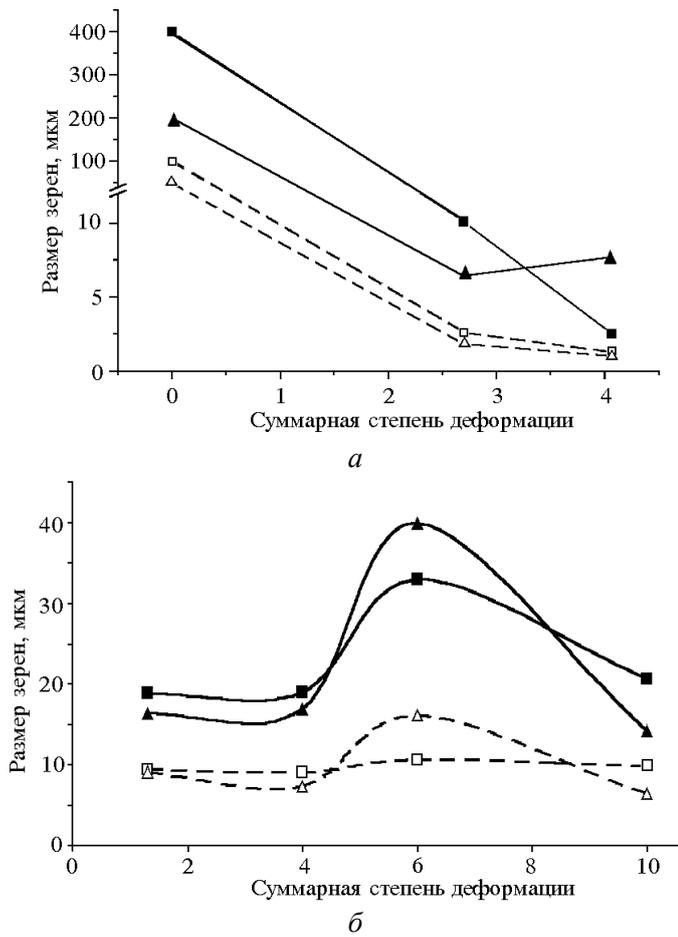


Рис. 4. Изменение размеров зерен в зависимости от вида комбинированной деформации: *a* – ВП + прокатка; *б* – прокатка + ВП; ■, ♦ – максимальные значения соответственно для параллельных и перпендикулярных сечений; □, Δ – минимальные значения соответственно для параллельных и перпендикулярных сечений

Микроструктура образцов, подвергнутых КД1, в плоскости, перпендикулярной оси деформации, характеризуется разнотернистостью, сочетанием равноосных и слабо вытянутых зерен (рис. 4,*a*). В плоскости, параллельной оси ВП, наблюдаются вытянутые зерна, расположенные под некоторым углом к оси деформации, коэффициент вытянутости $k = 5,6$ (рис. 5,*a*). Прокатка образцов привела к качественным изменениям структуры. Если до прокатки в плоскости, совпадающей с ее направлением, структура имела сильно вытянутые зерна, то после прокатки фиксировалась равноосная структура. Противоположные изменения структуры произошли и в поперечном сечении: равноосные зерна преобразовались в сильно вытянутые (рис. 6). Нетипичная структура, сформированная прокаткой после ВП, вероятнее всего, связана с тем, что реализуется поворот зерен на некоторый угол под действием напряжений, вызванных прокаткой.

Таблица
Статистическая обработка значений микротвердости и размера зерна

Состояние	Степень деформации ϵ	Микротвердость H_{μ} , МПа	Средний размер зерна $d_{\text{ср}}$, мкм	Экссесс		Асимметрия		Стандартное отклонение	
				H_{μ}	$d_{\text{ср}}$	H_{μ}	$d_{\text{ср}}$	H_{μ}	$d_{\text{ср}}$
КД1	ВП	$\frac{1040}{1080}$	$\frac{6,0}{4,5}$	$\frac{-0,61}{-0,14}$	$\frac{9,21}{3,82}$	$\frac{-0,39}{0,21}$	$\frac{2,07}{1,08}$	$\frac{5,06}{8,17}$	$\frac{1,03}{0,48}$
		$\frac{1310}{1255}$	$\frac{1,8}{4,5}$	$\frac{-0,85}{0,37}$	$\frac{2,32}{1,6}$	$\frac{0,03}{0,78}$	$\frac{1,36}{1,07}$	$\frac{8,19}{7,2}$	$\frac{1,21}{2,93}$
КД2	Прокатка	$\frac{757}{953}$	$\frac{14,3}{25,6}$	$\frac{1,9}{-1,2}$	$\frac{2,67}{0,27}$	$\frac{0,8}{0}$	$\frac{1,51}{0,76}$	$\frac{6,3}{3,7}$	$\frac{1,05}{0,69}$
		$\frac{1189}{835}$	$\frac{14,1}{12,2}$	$\frac{-0,1}{-1,05}$	$\frac{5,69}{-0,37}$	$\frac{0,65}{0,25}$	$\frac{2,0}{0,69}$	$\frac{5,1}{8,5}$	$\frac{1,08}{1,26}$
	ВП	$\frac{1249}{770}$	$\frac{21,9}{28,1}$	$\frac{0,2}{4,1}$	$\frac{-0,44}{6,43}$	$\frac{1,0}{1,8}$	$\frac{0,52}{1,9}$	$\frac{5,0}{3,7}$	$\frac{0,87}{1,08}$
		$\frac{1201}{740}$	$\frac{15,3}{10,4}$	$\frac{-0,6}{2,3}$	$\frac{8,75}{0,39}$	$\frac{0,2}{0,9}$	$\frac{2,46}{1,09}$	$\frac{3,7}{5,7}$	$\frac{1,41}{1,09}$

Примечание: числитель – значения для параллельного сечения, знаменатель – для перпендикулярного.

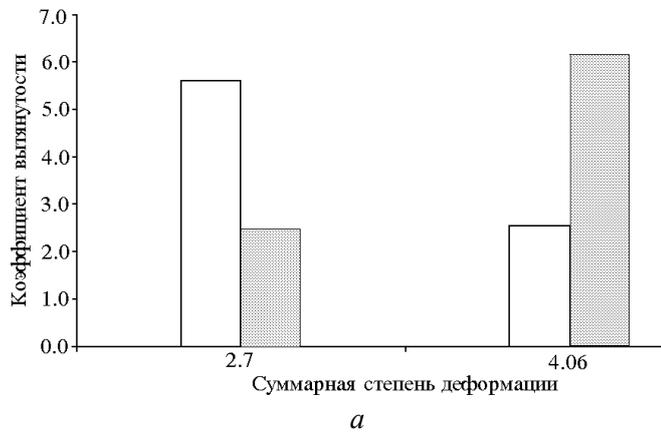
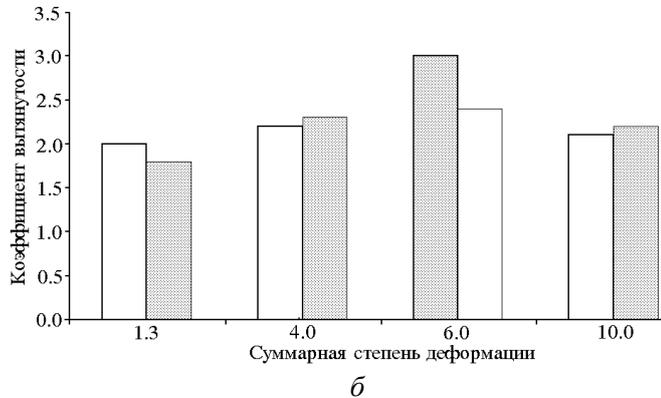


Рис. 5. Изменение значений коэффициента вытянутости зерен в зависимости от вида комбинированной деформации: *a* – ВП + прокатка; *б* – прокатка + ВП; □ – параллельное сечение; ▨ – перпендикулярное



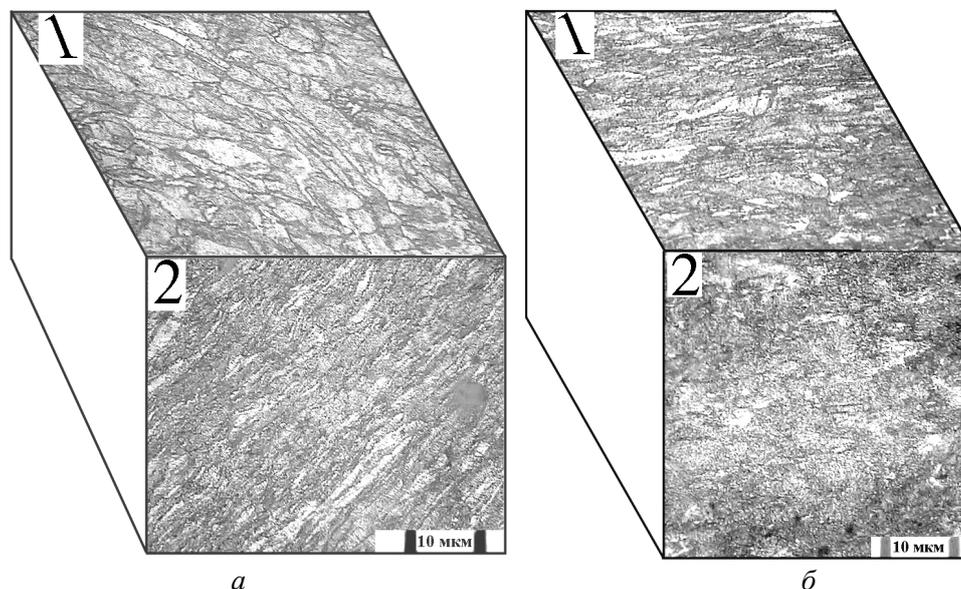


Рис. 6. Микроструктура меди М1, полученная при КД1: *а* – после ВП; *б* – после ВП + прокатка ($e = 4,06$). Сечение \perp оси деформации (1) и \parallel ей (2)

В случае применения КД2 микроструктура характеризуется изменением коэффициента вытянутости в пределах от 1,8 до 3,0 при повышении степени деформации до $e = 6,0$ (рис. 5,б). В параллельном сечении с ростом степени деформации до $e = 6,0$ увеличение коэффициента вытянутости составляет 33%. При дальнейшем росте деформации до $e = 10,0$ коэффициент вытянутости уменьшается до значения, сравнимого с его величиной при $e = 4,0$. В перпендикулярном сечении наблюдается аналогичная картина: при $e = 4,0$ увеличение коэффициента вытянутости составляет 25%. Дальнейший рост e вызывает уменьшение значения k , т.е. зерно становится более равноосным (рис. 7). Действительно, это подтверждается изменением минимального и максимального размеров зерен (см. рис. 4,б): с повышением степени деформации максимальный размер растет, а минимальный – колеблется в пределах значения, полученного после прокатки.

Положительный коэффициент асимметрии обусловлен систематической ошибкой, определяемой методикой обсчета. Коэффициент эксцесса имеет наибольшее значение в параллельном сечении (таблица) при максимальных степенях деформации. Это значит, что размеры зерен локализованы вблизи средней величины, т.е. структура наиболее однородна. Стандартное отклонение во всех случаях невелико, что дополнительно подтверждает наличие довольно узкого диапазона размещения размеров зерен относительно среднего. Наибольшее стандартное отклонение (2,93) зафиксировано при КД1 в перпендикулярном сечении после прокатки, что объясняется наличием крупных вытянутых зерен.

Сравнивая два типа деформации, видим, что при КД1 коэффициент k в сечении, параллельном оси деформации, уменьшается на 53,6%, а в перпендикулярном – увеличивается на 59,7%, что свидетельствует о повороте зерен с

ростом деформации. В случае КД2 при степени деформации в 2–2,6 раза большей, чем при КД1, увеличение k составляет 33 и 25% соответственно в параллельном и перпендикулярном сечениях.

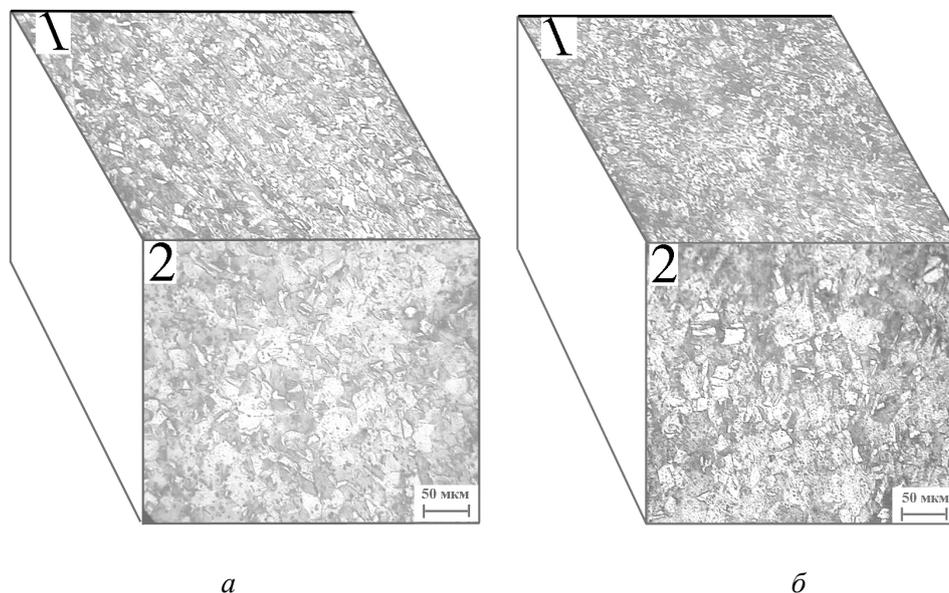


Рис. 7. Микроструктура меди М1, полученная при КД2: *a* – после прокатки; *б* – после прокатки + ВП ($e = 4,0$). Сечение \perp оси деформации (1) и \parallel ей (2)

Следовательно, сочетание ВП + прокатка при меньших степенях деформации приводит к большим изменениям в структуре и свойствах, чем сочетание прокатка + ВП, которое даже при высоких (до 87%) значениях степени деформации остается менее эффективным. При увеличении степени деформации коэффициент вытянутости зерен при КД1 изменяется во взаимно противоположных направлениях в параллельном и перпендикулярном сечениях. Это свидетельствует о провороте зерен в направлении, перпендикулярном оси деформации. При КД2 коэффициент k увеличивается и в параллельном, и в перпендикулярном сечениях, что позволяет судить о формировании вытянутых зерен в плоскости, расположенной под углом к оси деформации.

Выводы

Проведенный сравнительный эксперимент показал, что процессы трансформации структуры происходят при обеих схемах комбинированной пластической деформации. Однако при первой схеме нагружения (КД1) они протекают значительно интенсивней, чем при второй (КД2). Об этом свидетельствует степень изменения структуры и свойств материала. Следовательно, для интенсификации процессов винтового прессования необходимо проводить на материале, свободном от каких-либо напряжений (т.е. отожженном, отпущенном). Это позволяет формировать особенную зеренную и дислокационную структуру, ярко проявляющую свои свойства при дальнейшей деформации. Поэтому для материалов, прошедших ВП, целесообразно при-

менять прокатку, волочение, гидроэкструзию и т.д. Проведение ВП на деформированном металле несущественно меняет полученную структуру и свойства. В этом случае структура имеет значительное количество дефектов, сформированных ранее, и их вклад в свойства материала является определяющим. По-видимому, снижение плотности дефектов за счет отжига позволяет во время ВП сформировать в материале значительное количество границ зерен, субграниц, дислокаций, определяющих в дальнейшем реализацию новых механизмов деформации, нетипичных для данных материалов и схем деформации.

1. Р.А. Андриевский, А.М. Глезер, ФММ **88**, № 1, 50 (1999).
2. Р.З. Валиев, И.В. Александров, Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, Москва, Логос (2000).
3. Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, В.Г. Сынков, А.Н. Сапронов, С.Г. Сынков, ФТВД **9**, № 3, 109 (1999).
4. В.Н. Варюхин, Е.Г. Пашинская, Л.С. Метлов, А.Ф. Морозов, А.С. Домарева, С.Г. Сынков, В.Г. Сынков, Т.П. Заика, ФТВД **12**, № 1, 29 (2002).
5. В.Н. Варюхин, Е.Г. Пашинская, З.А. Самойленко, В.Г. Сынков, В.В. Пашинский, Я.Е. Бейгельзимер, С.Г. Сынков, Металлы № 3, 79 (2001).

E.G. Pashinskaya, S.G. Synkov, V.M. Tkachenko, A.S. Domareva, Yu.A. Yudina

EVOLUTION OF MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF COPPER UPON A COMBINED DEFORMATION BY TORSIONAL EXTRUSION AND ROLLING

A relationship between the scheme of combined plastic deformation upon two-component loading and submicrostructure changes in copper has been analysed. A comparative analysis of the combined deformation types: torsional extrusion (TE) + rolling and rolling + TE has been realized. It is shown that with first scheme of loading, the processes of structure transformation under load are more intensive than in the case of second one.

Fig. 1. Changes in the density of copper after combined deformation of the second type (CD2)

Fig. 2. Changes in the values of hardness depending on the type of combined deformation: *a* – TE + rolling; *b* – rolling + TE; □ – parallel section; ▤ – perpendicular one

Fig. 3. Changes in microhardness value depending on combined-deformation type: *a* – TE + rolling; *b* – rolling + TE; □ – parallel section; ▤ – perpendicular one

Fig. 4. Changes in grain size depending on combined-deformation type: *a* – TE + rolling; *b* – rolling + TE; ■, ♦ – maximum values for parallel and perpendicular sections, respectively; □, Δ – minimal values for parallel and perpendicular sections, respectively

Fig. 5. Changes in values of the grain elongation factor depending on the type of combined deformation: *a* – TE + rolling; *b* – rolling + TE; □ – parallel section; ▤ – perpendicular one

Fig. 6. Microstructure of copper M1 as a result of CD1: a – after TE; b – after TE + rolling ($e = 4,06$). Cross-section \perp (1) and \parallel (2) to deformation axis

Fig. 7. Microstructure of copper M1 as a result of CD2: a – after rolling; b – after rolling + TE ($e = 4,0$). Cross-section \perp (1) and \parallel (2) to deformation axis