

PACS: 81.40.-z

Г.А. Баглюк¹, Л.А. Рябичева², Т.А. Рябовол², В.С. Курихин¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК ПОСЛЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

¹Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины
ул. Кржижановского, 3, г. Киев, 03142, Украина
E-mail: gbag@rambler.ru

²Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля
кв. Молодежный, 20а, г. Луганск, 91034, Украина
E-mail: ryabic@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18 марта 2011 года

Приведены результаты экспериментального исследования равноканального углового (РКУ) прессования спеченных пористых заготовок из порошка меди ПМС-1. С применением прямых и косвенных экспериментальных методов (координатных сеток и оценки твердости) изучены форма очага деформации, распределение плотности и накопленной деформации по продольному сечению образцов. Показана существенная неравномерность распределения плотности и накопленной деформации по сечению образцов, что проявляется в наличии повышенных значений твердости в зоне очага деформации и соответственно их пониженных значений в застойной и концевой зонах.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, пористость, координатная сетка, спеченная заготовка

Введение

В последние годы использование методов интенсивной пластической деформации (ИПД) для получения объемных наноструктурных металлов и сплавов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой в субмикроструктурном или нанокристаллическом диапазонах становится одним из наиболее актуальных направлений современного материаловедения [1–6]. Такие УМЗ-металлы и сплавы рассматриваются как перспективные конструкционные и функциональные материалы нового поколения, что является причиной растущего интереса к развитию методов ИПД, позволяющих формировать УМЗ-структуры, которые принципиально изменяют свойства металлов и сплавов за счет обеспечения сочетания их высокой прочности и пластичности.

Несмотря на активное развитие в последующие годы некоторых новых методов ИПД (винтовая и уширяющая экструзия, равноканальная многоугловая экструзия, деформация по схеме «песочные часы» и др. [7]), РКУ-прессование остается наиболее широко применяемым и изучаемым методом. Результаты исследований последних лет показали, что РКУ-прессование можно успешно использовать для получения однородных УМЗ-микроструктур в различных металлических материалах.

Однако в подавляющем количестве работ, посвященных вопросам изучения процессов РКУ-прессования, основным объектом исследований служили компактные материалы, полученные с применением традиционных методов литейного передела, тогда как возможности использования РКУ-прессования для изготовления материалов с ультрадисперсной структурой из широкого класса пористых порошковых и композиционных материалов также вызывает несомненный интерес. При этом следует учесть, что процессы деформирования пористых заготовок ввиду наличия исходной пористости последних характеризуются большим числом степеней свободы по сравнению с деформированием компактных материалов, что предопределяет необходимость дополнительного учета эволюции распределения плотности в процессе прессования.

Целью настоящей работы было исследование с применением прямых и косвенных экспериментальных методов формы очага деформации, распределения плотности и степени накопленной деформации в образцах, полученных РКУ-прессованием спеченных пористых заготовок из медного порошка.

Материалы и методы исследований

В качестве исходного материала для пористых заготовок использовали порошок медный стабилизированный марки ПМС-1 (ГОСТ 4960–75) фракции 100 μm , изготовленный электролитическим методом. Форма частиц порошка дендритная; насыпная плотность 1.8 g/cm^3 .

Исходные заготовки, полученные по схеме двустороннего прессования, имели размеры поперечного сечения 15 × 15 mm и длину 60 mm. После прессования заготовки спекали в электрической печи сопротивления при температуре 950°C с выдержкой 60 min в среде синтез-газа. Средняя по объему относительная плотность спеченных заготовок составляла 0.75–0.85.

Деформирование спеченных заготовок выполняли в пресс-форме для РКУ-прессования, конструктивная схема которой приведена на рис. 1. Собственно РКУ-прессование выполняли на гидравлическом прессе модели ПД-476 усилием 1600 kN. Для уменьшения влияния трения на внешнюю поверхность на заготовки и на внутреннюю поверхность каналов матрицы наносили смазку из смеси порошка дисульфида молибдена с машинным маслом.

Оценку деформированного состояния заготовки в процессе прессования осуществляли методами координатных сеток и оценки распределения твердости в плоскости вертикального продольного сечения деформированных заготовок.

Для этого перед деформированием проводили порезку заготовок в продольном направлении и на одну из частей наносили координатную сетку с размером ячейки 2.5×2.5 mm. В процессе деформирования координатная сетка изменяла форму своих ячеек, что позволяло визуально оценить кинематику деформации в процессе прессования в разных зонах заготовки.

Результаты исследований и их обсуждение

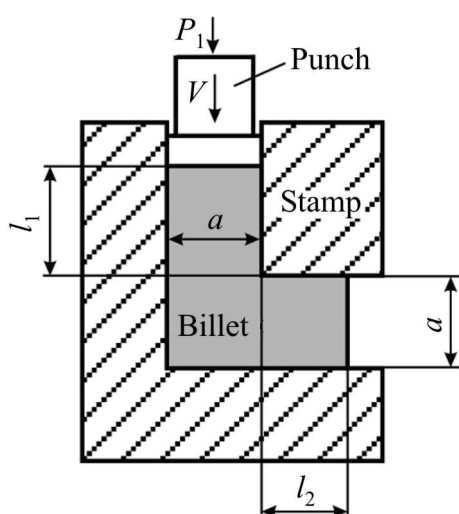


Рис. 1. Схема РКУ-прессования пористых заготовок

Как показали результаты экспериментов, при РКУ-прессовании пористых спеченных заготовок с использованием известной схемы деформации (рис. 1) не удается обеспечить стабильное получение бездефектных прессовок при любых значениях исходной пористости заготовок (10–25%). Как видно из макрофотографий деформированных деталей (рис. 2, а), в исходной части заготовки наблюдается существенная неравномерность деформации, которая сопровождается появлением макротрещин под углом, близким к 45° относительно нижней контактной поверхности горизонтальной части рабочего канала матрицы.

На свободной поверхности исходной зоны заготовки наблюдаются растягивающие напряжения (подобные растягивающим напряжениям на боковой поверхности заготовок, подвергающихся свободной осадке при наличии



Рис. 2. Внешний вид деформированных заготовок (а) и координатной сетки на продольном сечении заготовки (б) после РКУ-прессования

контактного трения), которые приводят к появлению вторичной пористости в зонах, прилегающих к концевой свободной поверхности деформированной заготовки. Происходит коалесценция отмеченной вторичной пористости в поверхностные микро- и макротрещины (рис. 2,б).

Причиной отмеченных эффектов является отрицательное влияние контактных явлений, которые наблюдаются в зоне контакта нижней поверхности деформируемой заготовки с неподвижными элементами прессовой оснастки, главным образом – с нижней стенкой горизонтального выходного канала матрицы. При этом отрицательное влияние контактных явлений полностью не нейтрализуется даже при наличии смазывающего слоя, который наносился на внутренние рабочие поверхности матрицы и на поверхность заготовок.

В то же время в левом нижнем углу прессовки, деформированной по схеме РКУ-прессования, отчетливо видна застойная зона (рис. 2,б), граница которой является границей разрыва касательных компонент скорости деформаций вдоль пластической области [1].

С целью анализа распределения пористости и степени накопленной деформации материала по продольному сечению заготовки, которая подвергалась РКУ-прессованию, осуществляли замеры твердости по Бринеллю по площади продольного сечения с шагом 5 мм (рис. 3).

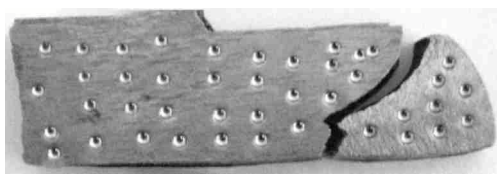


Рис. 3. Схема замера твердости по продольному сечению заготовки после РКУ-прессования

Принимая во внимание то, что величина твердости в каждой точке деформированной заготовки из пористого материала при прочих равных условиях определяется локальным значением плотности и степенью накопленной деформации материала основы, замеры твердости проводили как непосредственно после РКУ-прессования, так и после дальнейшего отжига отпрессованных заготовок в среде аргона при 600°C.

Результаты замеров твердости по сечению заготовки приведены на рис. 4. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы, которые коррелируют также и с результатами анализа изменения координатной сетки (см. рис. 2,б). Как видно из рис. 4,а,б, концевая зона заготовки (ячейки X(11–12); Y(1–3)) отличается существенно меньшими значениями твердости по сравнению с центральными зонами вследствие отсутствия подпора на выдавливаемую часть прессовки и, как результат, низкого уровня компонент шаровой составляющей тензора напряжений в этой зоне прессовки.

Застойная – нижняя угловая (ячейки X(1–2); Y(1–2)) часть заготовки имеет пониженные значения твердости как в деформированном, так и отожженном состояниях (рис. 4,а,б). Максимальная твердость проявляется в области, относящейся к очагу деформации, и примыкающих к нему зонах (ячейки X(3–6); Y(2–3)), что объясняется повышенным уровнем значений компонент шаровой составляющей тензора напряжений в этой зоне и значительными сдвиговыми деформациями.

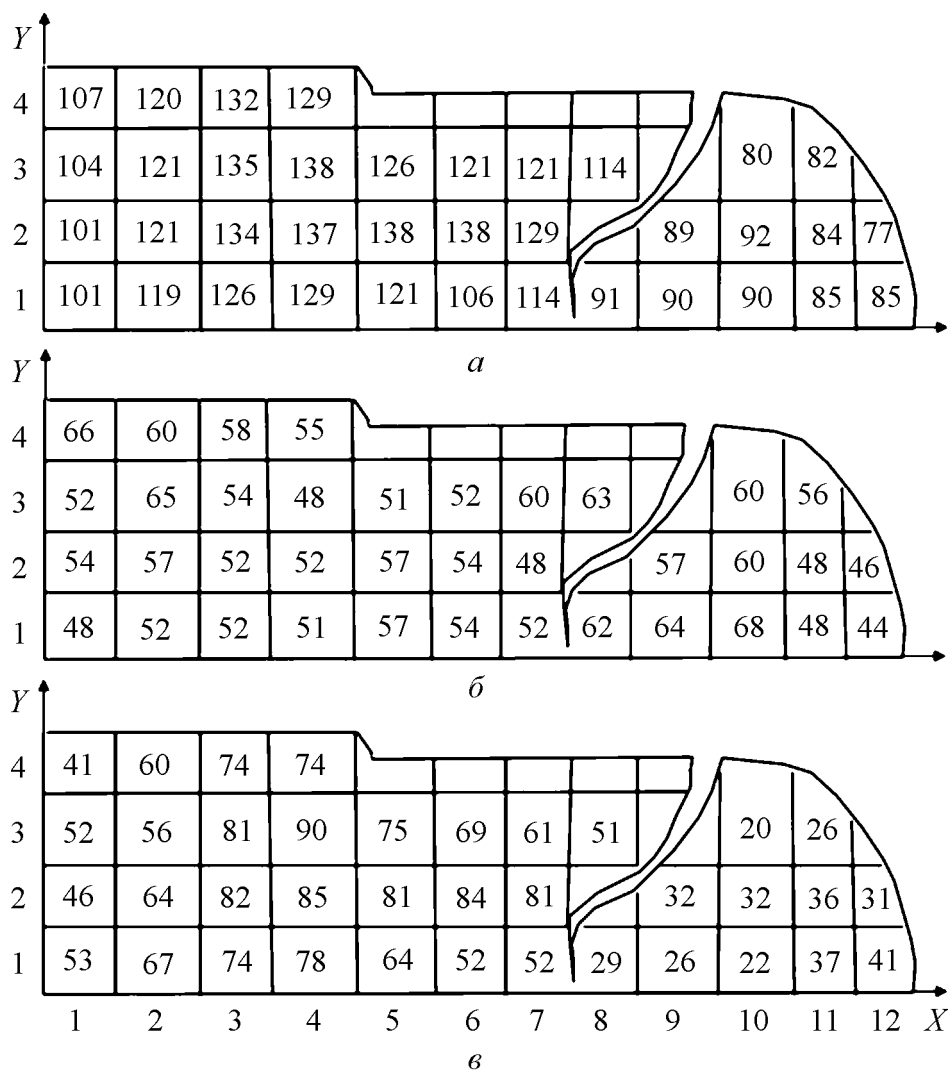


Рис. 4. Распределение твердости по Бринеллю (МПа, $\times 0.1$) по продольному сечению заготовки после РКУ-прессования HV_p (а), последующего отжига HV_{ann} (б) и разность $\Delta HV = HV_p - HV_{ann}$ значений твердости после прессования и отжига (в)

В то же время нижний, приконтактный относительно нижней плоскости полости матрицы слой выходной зоны ($X(1-7); Y1$) имеет несколько меньшую твердость по сравнению с вышерасположенными слоями вследствие затрудненной деформации в области этого слоя в результате действия сил приконтактного трения.

Соответствующие сдвиговые напряжения приводят к локализации зоны деформации, которая вызывает появление разрыва скоростей деформации в горизонтальном направлении по высоте заготовки и сопровождается образованием трещины под углом, близким к 45° относительно нижней горизонтальной плоскости полости матрицы.

Обращают на себя внимание достаточно высокие значения твердости, коррелирующей с локальной плотностью, в верхней части отожженной деформируемой заготовки, расположенной над застойной зоной ($X(1-2); Y4$).

Это может быть следствием повышенных значений сопротивления истечению металла и соответственно вертикальной компоненты тензора напряжений, обусловленной наличием нижерасположенной жесткой застойной зоны.

Особый интерес вызывает также степень накопленной деформации материала основы в разных ее зонах, которую в первом приближении можно принять коррелирующей с локальными значениями разности ΔH_V значений твердости в заготовках непосредственно после РКУ-прессования H_{V_p} и заготовках после дальнейшего отжига $H_{V_{ann}}$.

Анализ рис. 4,в показывает, что если в области очага деформации (ячейки $X(3-5)$; $Y(2-3)$) эта разность достигает 750–900 МПа, в застойной зоне (ячейки $X(1-2)$; $Y(1-2)$) – 460–670 МПа, то в концевой зоне – лишь 200–370 МПа. Обращает на себя внимание тот факт, что в зоне заготовки, которая расположена под вертикальным деформирующим пуансоном ($X(1-4)$; $Y(1-4)$), наблюдается монотонное увеличение значения ΔH_V от задней торцевой вертикальной стенки ($X = 0$) к концевой зоне на всех горизонтальных уровнях прессовки.

Следует отметить, что полученные экспериментальные данные достаточно хорошо коррелируют с результатами численного моделирования процесса РКУ-прессования спеченных пористых заготовок, представленными в [8].

Выводы

При использовании традиционной схемы РКУ-прессования пористых спеченных заготовок не удастся обеспечить стабильное получение бездефектных прессовок вследствие существенной неравномерности деформации, которая сопровождается появлением макротрещин под углом, близким к 45° относительно нижней контактной поверхности горизонтальной части рабочего канала матрицы.

Концевая зона выдавливаемой заготовки отличается повышенным значением пористости по сравнению с центральными зонами ввиду низкого уровня компонент шаровой составляющей тензора напряжений в этой области.

Полученные результаты приводят к выводу о необходимости применения при РКУ-прессовании пористых материалов систем противодействия на выдавливаемый участок заготовки, а также, вероятно, схем деформации с использованием активных сил трения.

1. В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев, Процессы пластического структурообразования металлов, Наука и техника, Минск (1994).
2. Р.З. Валиев, И.В. Александров, Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, Логос, Москва (2000).
3. H.S. Kim, Y. Estrin, M.B. Bush, Acta Mater. **48**, 493 (2000).
4. М.И. Мазурский, Ф.У. Еникеев, КШП № 7, 15 (2000).

5. *Properties and nanostructures of materials processed by SPD techniques*, Ultrafine Grained Materials II, Y.T. Zhu, T.G. Langdon, R.S. Mishra, S.L. Semiatin, M.J. Saran, T.C. Lowe (eds.), TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) (2002).
6. *М.В. Дегтярев, Л.М. Воронова, В.В. Губернаторов, Т.И. Чащухина*, ФММ 90, № 6, 83 (2000).
7. *Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Д.В. Орлов, С.Г. Сынков*, Винтовая экструзия – процесс накопления деформации, ТЕАН, Донецк (2003).
8. *А.П. Майданюк, М.Б. Штерн, Г.А. Баглюк, Л.А. Рябичева, Е. Олевский*, Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні, Краматорськ (2008).

Г.А. Баглюк, Л.О. Рябичева, Т.О. Рябовол, В.С. Куріхін

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОРИСТИХ ЗАГОТОВОК ПІСЛЯ РІВНОКАНАЛЬНОГО КУТОВОГО ПРЕСУВАННЯ

Наведено результати експериментального дослідження рівноканального кутового (РКК) пресування спечених пористих заготовок із порошку міді ПМС-1. Із застосуванням прямих і непрямих експериментальних методів (координатних сіток і оцінки твердості) вивчено форму середовища деформації, розподіл щільності й накопиченої деформації по поздовжньому перетині зразків. Показано істотну нерівномірність розподілу щільності й накопиченої деформації по перетині зразків, що проявляється в наявності підвищених значень твердості в зоні середовища деформації й відповідно їхніх знижених значень у застійній і кінцевій зонах.

Ключові слова: інтенсивна пластична деформація, рівноканальне кутове пресування, поруватість, координатна сітка, спечена заготовка

G.A. Baglyuk, L.A. Ryabicheva, T.A. Ryabovol, V.S. Kurikhin

INVESTIGATION OF DEFORMED STATE OF POROUS BILLETS AFTER EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING

The results of experimental investigation of equal-channel angular (ECA) pressing of sintered porous billets made of copper powder PMS-1 are presented. The shape of deformation zone, distribution of density and accumulated deformation were investigated using direct and indirect methods (coordinate grids and hardness estimation) at the longitudinal section of samples. A substantial non-uniformity in distribution of density and accumulated deformation at section of samples is demonstrated that appears in presence of increased hardness values within the deformation zone and their reduced values in the stagnation and end zones of the sample, respectively.

Keywords: severe plastic deformation, equal-channel angular pressing, porosity, square grid, sintered preform

Fig. 1. Scheme of ECA pressing of porous billets

Fig. 2. The appearance of deformed samples (*a*) and configuration of coordinate grid at the longitudinal section (*б*) after ECA pressing

Fig. 3. The hardness measurement scheme by longitudinal section of samples after ECA pressing

Fig. 4. The distribution of hardness (Brinell hardness, МПа, $\times 0.1$) at longitudinal section of samples after ECA pressing HB_p (*a*), succeeding annealing HB_{ann} (*б*) and the difference $\Delta HB = HB_p - HB_{ann}$ of hardness values after ECA pressing and annealing (*в*)