

УДК 621.762.4

Рябичева Л. А.
Усатюк Д. А.
Беликова В. В.

ЭВОЛЮЦИЯ ОЧАГА УПЛОТНЕНИЯ ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВЫМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК

Равноканальное угловое выдавливание (РКУВ), которому в последнее время уделяют много внимания, используют, прежде всего, для получения ультрамелкозернистой структуры [1, 2]. Реализация схемы РКУВ предусматривает многократное продавливание пористой заготовки через два канала с одинаковым сечением, пересекающихся под углом 90° . Основным направлением исследований является определение влияния количества проходов на качество ультрамелкозернистой структуры, в частности на однородность распределения структурных показателей по объему.

Особый интерес вызывает процесс РКУ выдавливания пористых заготовок, полученных методами порошковой металлургии, когда наряду с деформационными параметрами, которые определяют свойства конечного изделия, важную роль играет начальная пористость [3]. При всех схемах деформации пористых заготовок с наименьшими энергетическими затратами максимальную плотность изделия можно получить при более высокой начальной плотности заготовки. Представляет интерес использование РКУ выдавливания для доуплотнения пористых заготовок.

Целью данной работы является определение изменения гидростатического давления и плотности в зависимости от начальной пористости порошковой заготовки при РКУ выдавливании.

При РКУ выдавливании в момент пересечения плоскости сопряжения входного вертикального и выходного горизонтального каналов OO' (рис. 1), наклон которой определяется углом φ , деформируемая порошковая пористая заготовка испытывает значительную сдвиговую деформацию [4]:

$$\gamma = 2 \operatorname{ctg} \varphi. \quad (1)$$

При значении $\varphi = 45^\circ$, величина произведенной сдвигом деформации $\gamma = 2$.

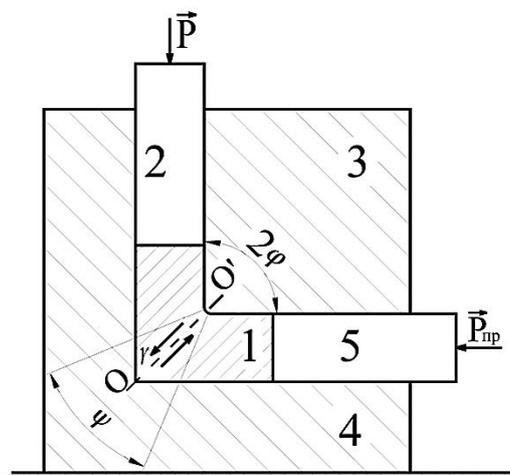


Рис. 1. Схема РКУ выдавливания:

1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – верхняя полуматрица; 4 – нижняя полуматрица; 5 – контрпуансон

При образовании во внешнем углу матрицы мертвой зоны с углом ψ величина произведенной деформации будет меньше [5]:

$$\gamma = 2[(\varphi + \psi) + \psi \operatorname{cosec}(\varphi + \psi)]. \quad (2)$$

Для закрытия пор при угловом выдавливании необходимо, чтобы величина сдвиговой деформации удовлетворяла условию [5]:

$$\gamma(\theta) = \theta \left[(\ln \theta - 1)^2 + 1 \right]. \quad (3)$$

При подстановке значений пористости $\theta = 0,4, 0,2$ и $0,1$ в выражение (3), сдвиговая деформация γ составит 1,87, 1,56 и 1,19. Отсюда следует, что условие (2) выполняется даже при максимальном значении $\psi = \pi/4$, когда внешний радиус закругления каналов матрицы равен нулю. Поскольку величина сдвиговой деформации при РКУВ велика, то для сохранения сплошности материала необходимо, чтобы на элементарный объем, находящийся в плоскости сдвига, действовало высокое гидростатическое давление σ^o . Для того чтобы поры не раскрывались, соотношение действующих на их поверхности величин гидростатического давления и сдвиговой прочности материала τ должны удовлетворять условию [4, 6]:

$$\frac{\sigma^o}{\tau} = c^2 \theta \frac{(\ln \theta - 1)^2 + 1}{\sqrt{3}\gamma}, \quad (4)$$

где $c = 0,25$ для сферических и $c = 0,33$ для цилиндрических пор.

На плоскости сдвига OO' , расположенной под 45° к направлению течения материала при $\gamma = 2$, это соотношение выполняется практически при любой пористости. Таким образом, в пористом материале при РКУВ должно происходить полное закрытие пор путем пластического формоизменения при гидростатическом давлении, удовлетворяющему условию (4).

Анализ РКУ выдавливания медной порошковой заготовки призматической формы сечением 15×15 мм, длиной 30 мм, начальной пористостью 40 %, 20 % и 10 % выполнен методом конечных элементов. Конечно-элементная модель РКУ выдавливания представлена на рис. 2, а. Входной и выходной каналы матрицы пересекаются под углом 90° . Внутренний радиус закругления каналов матрицы составляет 1,5 мм, а внешний равен нулю. Модель заготовки представлена сеткой из 40280 элементов с характерным размером элемента 1 мм, содержащей 10070 узловых точек. Характерный размер конечного элемента при разбиении модели инструмента равен 8 мм. При построении сетки в области сопряжения рабочих поверхностей инструмента характерный размер конечного элемента составил половину радиуса закругления. Общее количество конечных элементов модели составило 59200, количество узловых точек – 14800. Противодействие P_{np} принимали равным 130 МПа. Выдавливание заготовки осуществляется за счет перемещения пуансона 2. Оснастка представлена абсолютно жесткими телами. Для моделирования заготовки применяли упругопластическую модель материала. Упругие свойства материала: модуль упругости 124000 МПа, коэффициент Пуассона 0,3. Зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций построена по результатам испытаний на сжатие пористого тела и представлена таблицей в массиве исходных данных. При моделировании использована модель трения по Кулону. Величина коэффициента трения составила 0,05. Рассматривается изменение гидростатического давления на установившейся стадии течения, когда образец находится в выходном канале, в трех сечениях параллельно горизонтальной оси: на расстоянии 3 мм от нижней поверхности матрицы (сечение 1–1, рис. 2, б), по центру образца (сечение 2–2, рис. 2, б) и на расстоянии 3 мм от верхней поверхности заготовки (сечение 3–3, рис. 2, б).

Гидростатическое давление является шаровой компонентой тензора напряжений и характеризует жесткость схемы напряженного состояния в исследуемой точке. Если гидростатическое давление больше нуля, то схема считается жесткой, способной к образованию дефектов при деформировании металла, уменьшая его ресурс пластичности [7]. При всех

значениях пористости на установившейся стадии выдавливания все материальные точки образца находятся в состоянии гидростатического сжатия, которое обусловлено величиной противодействия, а также действием сил контактного трения.

При величине пористости 40 % во всех сечениях образца получены минимальные значения гидростатического давления (рис. 3, а). При таком значении пористости в большей степени развита структурная деформация, направленная на ее устранение и создание очага уплотнения. Наименьшие величины гидростатического давления наблюдаются в сечении 1–1, что можно объяснить проскальзыванием металла при выходе из входного канала матрицы, превосходящим сдвиговую деформацию, и кратковременным отрывом металла от нижней поверхности матрицы в последний момент установившегося течения.

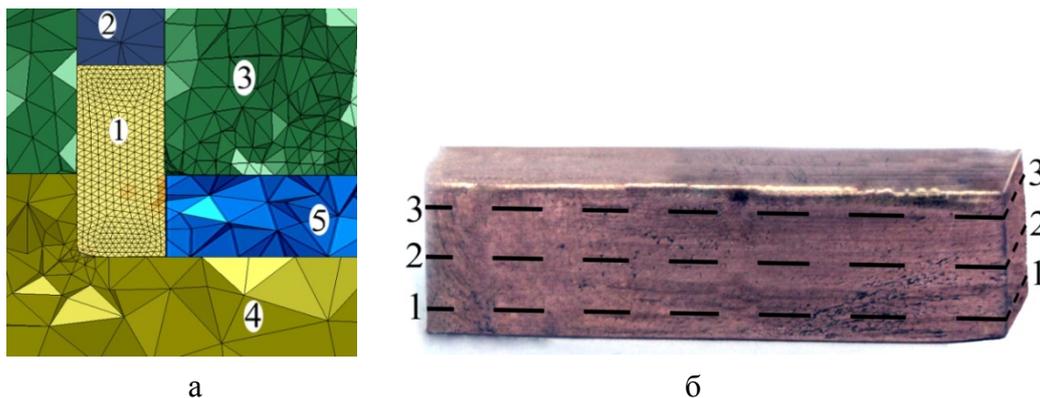


Рис. 2. Конечно-элементная модель РКУ выдавливания (а) и фото образца с исследуемыми сечениями (б):

1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – верхняя полуматрица; 4 – нижняя полуматрица; 5 – контрпуансон

В сечении 3–3 величины гидростатического давления больше, что является следствием влияния контактного трения на течение металла. В центральном сечении, проходящем через очаг уплотнения, гидростатическое давление максимально. Следует отметить, что очаг уплотнения имеет незначительный объем и смещен к конечной части образца. Несоответствие максимумов кривых свидетельствует о сложной форме очага уплотнения, который начинается приблизительно в средней части образца и распространяется к выходу из канала с подъемом концевой части к верхней поверхности матрицы.

С ростом пористости до 20 % величина гидростатического давления растет, но характер кривых не изменяется (рис. 3, б). Однако уменьшается структурная деформация и растет деформация твердой фазы. Можно отметить, что более интенсивно формируется очаг деформации. При пористости 10 % величина гидростатического давления наибольшая во всех трех сечениях образца (рис. 3, в) и наибольшие размеры очага деформации, соответственно.

Особенностью исследований является существование в основном очага уплотнения при $\theta_0 = 40\%$, который при более низких значениях начальной пористости трансформируется в очаг деформации.

Гидростатическое давление в большей мере влияет на рост плотности в объеме образца. Эксперименты показали, что максимальная плотность достигается, если начальная пористость заготовки выше (рис. 4). При этом распределение плотности при всех начальных значениях пористости зависит от объема очага уплотнения. При высоких значениях начальной пористости очаг уплотнения имеет небольшой объем, растущий при уменьшении пористости заготовки. При пористости 10 % изменение плотности в очаге деформации находится в пределах ошибки.

Исследования микроструктуры очага уплотнения и деформации показывают, что при начальной пористости 40 % частицы порошка вытягиваются вдоль направления выдавливания, изменения направления оси частиц не происходит (рис. 5, а). Это указывает на большой

объем структурной деформации и меньшей деформации твердой фазы. В структуре наблюдается значительная пористость. При начальной пористости 20 % и 10 % исходные частицы порошка вытягиваются вдоль оси, ориентированной под углом около 30° относительно продольной оси образца (рис. 5, б, в). Такая ориентация и форма частиц указывают, что деформация в очаге была однородной [4, 8].

Границы между частицами широкие и четко выражены, что указывает на слабую металлическую связь между ними. Очевидно, при всех значениях начальной пористости после выдавливания плотность получена высокая, однако прочность материала недостаточна. Действительно, предел прочности на сжатие составил 225 МПа, 248 МПа и 380 МПа при начальной пористости 40 %, 20 % и 10 % соответственно. Только больших деформаций и высокого гидростатического давления недостаточно для образования прочных контактов на границах раздела частиц.

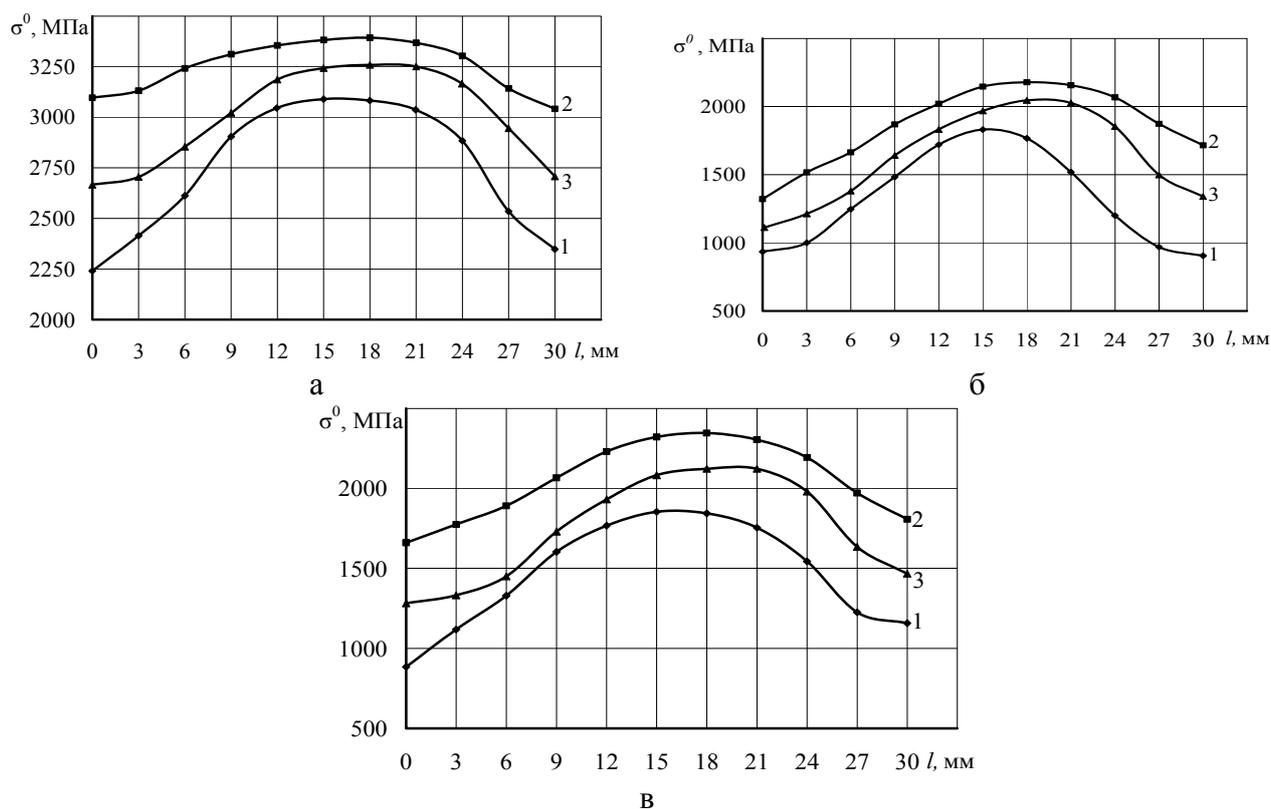


Рис. 3. Изменение гидростатического давления по длине образца при начальной пористости: а – 40 %, б – 20 %, в – 10 %: 1 – сечение 1–1; 2 – сечение 2–2; 3 – сечение 3–3

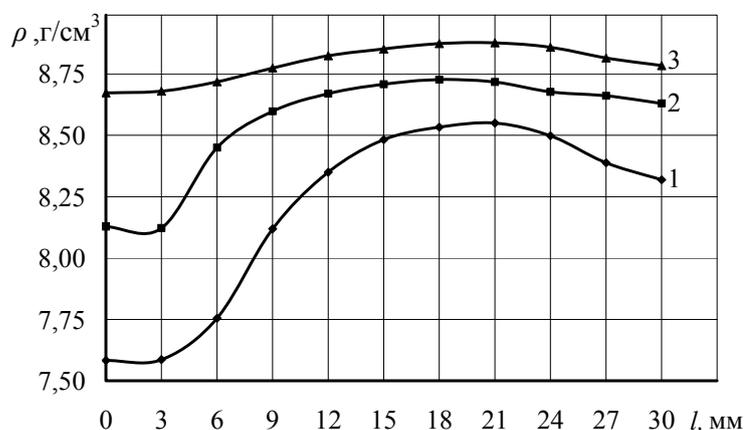


Рис. 4. Изменение плотности по длине образца при начальной пористости: 1 – 40 %; 2 – 20 %; 3 – 10 %

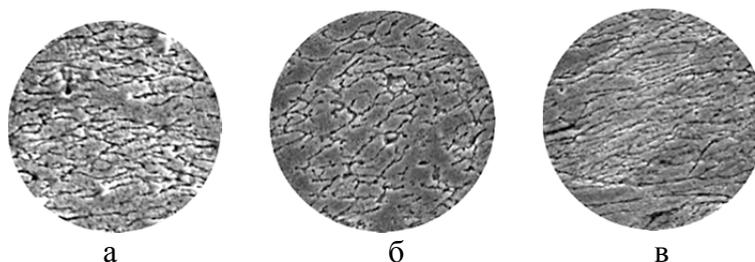


Рис. 5. Микроструктура очага деформации после выдавливания образцов с различной начальной пористостью ($\times 3000$):

а – 40 %, б – 20 %, в – 10 %

Вероятно, схватыванию порошков мешают также оксидные пленки, поверхностные загрязнения и адсорбированные газы, которые не выносятся из зоны контакта [3].

ВЫВОДЫ

Изучено влияние гидростатического давления на изменение очага уплотнения и деформации при РКУ выдавливании пористых заготовок. Получено увеличение гидростатического давления и плотности с уменьшением начальной пористости заготовки. На последних этапах установившейся стадии пластического течения наблюдается отрыв металла от нижней поверхности матрицы, что приводит к уменьшению влияния трения и увеличению гидростатического давления в верхнем сечении по сравнению с нижним сечением образца.

Показано, что при высокой начальной пористости в основном происходит уплотнение образца за счет структурной деформации. Деформация твердой фазы незначительна. С уменьшением начальной пористости гидростатическое давление направлено на деформацию твердой фазы, что подтверждается структурными исследованиями, показывающими поворот частиц относительно продольной оси деформации. С уменьшением начальной пористости получен рост плотности и увеличение объема очага деформации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р. З. *Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией* / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : Логос, 2000. – 271 с.
2. Рябичева Л. А. Анализ эволюции микроструктуры порошковой пористой заготовки при РКУ-прессовании / Л. А. Рябичева, В. В. Смоляк // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2011. – № 1 (12). – С. 148–155.
3. Русин Н. М. Исследование особенностей пластического течения на макроскопическом уровне в порошковых телах при равноканальном угловом прессовании / Н. М. Русин // *Перспективные материалы*. – 2007. – № 4. – С. 83–91.
4. Сегал В. М. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов. – Минск : Наука и техника, 1994. – 232 с.
5. Segal V. M. Variation of the density of porous materials during plastic shaping / V. M. Segal, V. I. Reznikov, V. F. Malyshev // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Volume 18, Issue 7. – 1979. – P. 427–431.
6. Microstructural characteristics of ultrafinegrained aluminum produced using equal-channel angular pressing / Y. Iwahashi, M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, T.G. Langdon // *Metallurgical and materials transaction*. – 1998. – V. 29A. – P. 2245–2252.
7. Русин Н. М. Влияние контактного трения на процесс РКУ-экструзии материалов. Часть II. Экструзия образцов с покрытиями / Н. М. Русин, X. В. Ким // *Трение и износ*. – 2002. – Т. 23, № 2. – С. 215–219.
8. The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing / M. Furukawa, Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Nemoto, T. G. Langdon // *Mater. Sci. Eng.* – 1998. – V. 257A. – P. 328–332.

Рябичева Л. А. – д-р техн. наук, проф. ВНУ им. В. Даля;
Усатюк Д. А. – канд. техн. наук, доц. ВНУ им. В. Даля;
Беликова В. В. – ассистент ВНУ им. В. Даля.

ВНУ – Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, г. Луганск.

E-mail: ryabic@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19.03.2013 г.