

УДК 621.7

Бейгельзимер Я. Е.
Прилепо Д. В.
Гришаев В. В.
Абрамова Е. А.
Воеводский С. В.

ПЛОСКАЯ ВИНТОВАЯ ЭКСТРУЗИЯ ВТОРИЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК7

Интенсивные пластические деформации (ИПД) можно охарактеризовать как методы обработки металлов при высоком гидростатическом давлении. Благодаря ИПД в объемных образцах накапливаются высокие степени деформации. При этом значительно измельчаются зёрна, происходит сильная разориентировка их кристаллографических направлений, в результате чего их границы становятся больше угловыми [1]. По этим причинам существенно повышается прочность металла при сохранении высокой пластичности. В настоящее время доступны несколько различных схем ИПД, в частности, кручение под высоким давлением (КВД) [2], равноканальное угловое прессование (РКУП) [3], всесторонняя изотермическая ковка (ВИК) [4], аккумулярующая прокатка со сдвигом (АПС) [5], многослойная прокатка с упрочнением (МПУ) [6] и винтовая экструзия (ВЭ) [7].

КВД происходит при давлениях, на порядок больших, чем в других процессах ИПД. Это обеспечивает уникальные возможности достижения больших деформаций и создания ультрамелкозернистых (УМЗ) структур. Вследствие малого размера образцов, КВД может быть использовано, в основном, лишь в лабораторных исследованиях. Известные процессы РКУП, ВИК, АПС, МПУ позволяют обрабатывать заготовки достаточно большого объема [1]. Каждый из них имеет свои особенности и области применения. Определённый интерес представляет собой процесс ВЭ.

В работе [8] показано интенсивное перемешивание материала при ВЭ, его гомогенизация и предложено использовать этот метод для обработки заготовок из вторичных алюминиевых сплавов с целью повышения их технологической пластичности.

Процесс ВЭ в своем первоначальном виде не позволяет обрабатывать заготовки длиной более 100 мм (при сечении 25×40 мм). Это связано с потерей устойчивости штока и ограниченной высотой рабочей зоны пресса.

В [9] была предложена модификация ВЭ в канале с плоскопараллельными стенками – плоская винтовая экструзия (ПВЭ), позволяющая обрабатывать длинномерные заготовки. Главное отличие ПВЭ (рис. 1, а) от ВЭ (рис. 1, б) состоит в форме канала матрицы. В ПВЭ две противоположные стенки матрицы плоские. Плоские стенки матрицы могут быть как подвижными, так и неподвижными. Подвижные плоские стенки могут перемещаться вместе с заготовкой, либо опережать ее. Это позволяет управлять условиями контактного трения в очаге деформации и тем самым влиять на силовые параметры, а, возможно, и на течение металла. Так же становится очевидной необходимость уменьшения доли поверхности с пассивным трением. Из этого следует, что применение прямоугольного сечения канала более предпочтительно, чем квадратное, так как более широкие подвижные стороны больше снижают трение.

В работе [10] исследован процесс, аналогичный ПВЭ с неподвижными стенками в канале квадратного сечения.

Целью работы является исследование процесса РТЕ в прямоугольном канале с подвижными стенками. Основное внимание работы уделено изучению возможности гомогенизации сплавов методом РТЕ.

Принцип плоской винтовой экструзии.

Схема канала матрицы для РТЕ показана на рис. 1, а. Канал имеет три характерных участка: входной, деформирующий и выходной [9].

Входной и выходной каналы имеют прямоугольное сечение, деформирующий (средний) участок – переменное сечение. Форма сечения канала деформирующего участка изменяется вдоль оси от прямоугольника к параллелограмму и далее снова к прямоугольнику. При этом высота параллелограмма, остается равной высоте прямоугольника. Площадь поперечного сечения неизменна вдоль всей длины канала.

Грубая оценка, основанная на искажении поперечного сечения образца в деформирующем канале, дает деформацию $e = 2tg\alpha$ за один проход, где α – максимальный угол наклона стенки матрицы.

Методика проведения исследований.

На рис. 2, приведена схема установки для реализации ПВЭ с подвижными стенками. Входной и выходной участки канала установки имеют сечение 25×40 мм. Деформирующий участок длиной 35 мм имеет максимальный угол наклона $\alpha = 30^\circ$. Установка сконструирована так, что одни деформирующие части легко могут быть заменены на другие по мере их износа или необходимости применения другого угла наклона. Плоские боковые плиты установки перемещаются совместно с заготовкой. При этом шток пресса воздействует одновременно на торец заготовки и на подвижные боковые плиты.

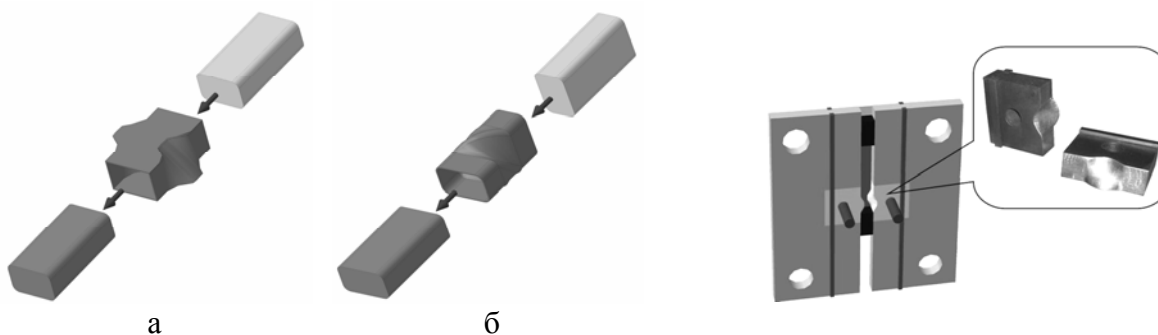


Рис. 1. Схемы каналов ПВЭ (а) и ВЭ (б)

Рис. 2. Установка ПВЭ с подвижными стенками (на рис. не показаны)

Для исследования гомогенизирующих свойств ПВЭ использовали вторичный алюминиевый сплав АК7 (Cu 1,5 %, Si 6,0–8,0 %, Fe 1,0 %, Mg 0,2–0,55 %, Zn 0,5 %, Mn 0,2–0,6 %, Ni 0,3 %, Al – остальное). Из сплава были отлиты заготовки размером $25 \times 40 \times 80$ мм. Литая структура заготовок имела значительно неоднородное распределение твердости (рис. 3). Исходная средняя величина твердости по сечению заготовок 29,3 HV. Перед обработкой заготовки покрывали низкотемпературной смазкой на основе PbO. Деформирование проводили при 280°C с противодействием 100 МПа. Процесс ПВЭ прекращали, когда средняя часть заготовки заполняла деформирующую часть канала (рис. 4). Затем образец извлекали из канала установки.

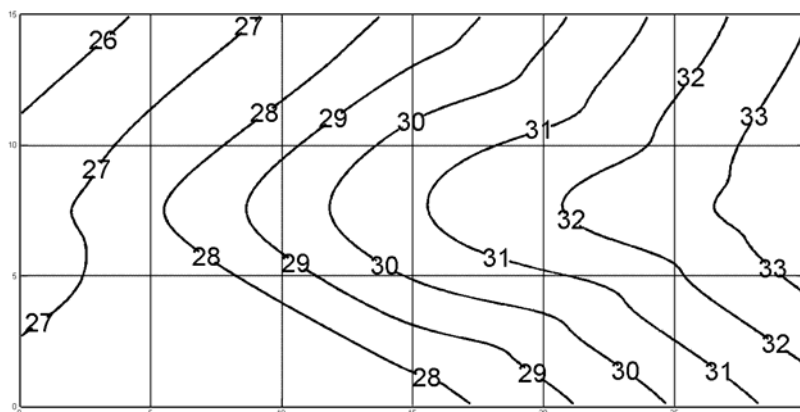


Рис. 3. Исходное распределение твердости в алюминиевой заготовке

Заготовки после обработки методом ПВЭ изучали в двух характерных сечениях: в промежуточном (с максимальным углом наклона α) и в конечном (в части образца, находящейся в выходном канале установки).

ВЭ проводили в неразборной матрице, поэтому заготовку продавливали через нее полностью. После ВЭ изучали образец в срединном сечении, соответствующем установившемуся течению материала. Установка ВЭ описана в работе [8].

В указанных сечениях обработанных алюминиевых образцов, определили твердость по Викерсу, HV по схеме, изображенной на рис. 5.

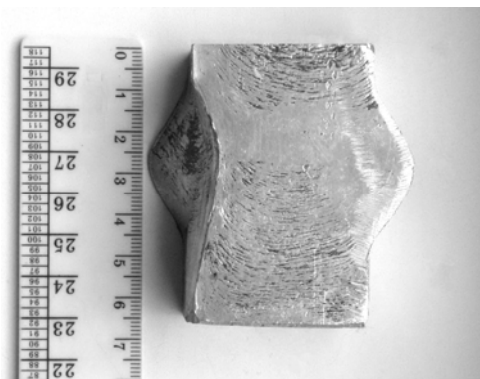


Рис. 4. Часть заготовки, изъятая из деформирующей части канала ПВЭ

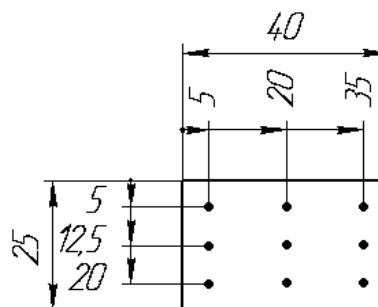


Рис. 5. Схема замеров твердости

При измерении твердости к индентору прикладывали нагрузку 5 кг с выдержкой 30 сек.

Моделирование деформированного состояния заготовок при обработке методами ВЭ и ПВЭ выполнено методом конечных элементов (МКЭ) в пакете «Deform-3D». Пакет позволяет решать задачу в трехмерной постановке. В расчете использовали тетраэдрические конечные элементы.

В качестве условия пластичности использовали соотношение $\sigma_u = \sigma_s$ теории пластического течения несжимаемых сред Леви-Мизеса, где σ_u – истинное напряжение, σ_s – сопротивление деформации. Реологическую кривую течения сплава определили в эксперименте на осадку и аппроксимировали кривой $\sigma = 95e^{0,17}$. Трение заготовки о стенки матрицы задали законом Зибеля $\tau = \mu\sigma_s$, с коэффициентом трения $\mu = 0,25$.

Результаты исследований.

На рис. 6 представлены изолинии твердости по сечениям алюминиевых образцов, полученные аппроксимацией измеренных значений. Рис. 6 показывает, что большее увеличение твердости происходит в острых углах канала установки ПВЭ. Видно, что в средней полосе сечений заготовки (после ПВЭ) твердость понижена (рис. 6, а, б). От середины образца к его коротким сторонам, претерпевшим изменение угла наклона, степень деформации растет подобно двум линейным фронтам. Наибольший рост твердости (от 29,3 HV до 41,6 HV) наблюдается в первой половине прохода ПВЭ. Во второй половине прохода происходит выравнивание твердости по сечению при незначительном ее росте (41,8 HV). Это означает, что произошло насыщение упрочнения и выравнивание свойств материала в процессе ПВЭ.

При ВЭ происходит увеличение твердости от центральной точки сечения к периферии (рис. 6, в). В общем картина распространения деформации соответствует описанной в [8]. Средняя по сечению твердость (40,0 HV) после ВЭ несколько ниже, чем в соответствующем сечении после ПВЭ.

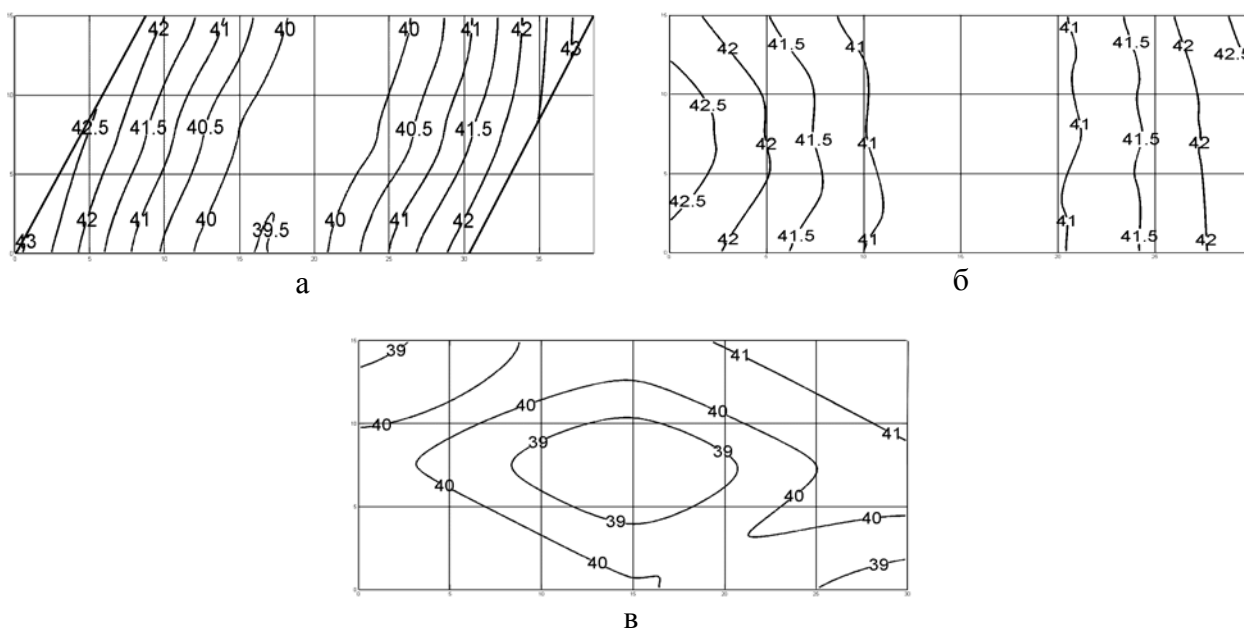


Рис. 6. Распределение твердости по сечениям алюминиевых образцов:
 а – промежуточное сечение образца после ПВЭ; б – конечное сечение после ПВЭ;
 в – срединное сечение после ВЭ

Несмотря на существенное различие картин распределения твердости в конечных сечениях после ПВЭ и ВЭ (рис. 6, б, в), обе схемы дают схожие средние величины твердости (41,6 HV для ПВЭ и 41,8 HV для ВЭ), а так же высокую степень однородности (в пределах 2–3 HV).

На рис. 7 приведены структуры вторичного алюминиевого сплава АК7 в литом состоянии и после одного прохода ПВЭ.



Рис. 7. Структуры вторичного алюминиевого сплава в литом состоянии (а) и после одного прохода ПВЭ б ($\times 200$) (б)

Хорошо видно, что в литой структуре имеется четко выраженный каркас из хрупких интерметаллических фаз, выделившихся по границам зерен сплава. В результате деформации методом ПВЭ каркас оказался раздробленным. Это повысило прочность и пластичность материала. Если в литом состоянии относительное сужение при разрыве $\psi = 17\%$, то после одного прохода ПВЭ $\psi = 28\%$.

На рис. 8 показано распределение накопленной деформации, рассчитанной методом конечных элементов. Как видно, при ПВЭ (рис. 8, а) накопленная деформация увеличивается линейным фронтом от середины сечения заготовки к сторонам, претерпевшим изменение угла наклона. Как и в случае физического моделирования (рис. 6), большее значение накопленной деформации наблюдается в острых углах канала. В случае ВЭ (рис. 8, б), накопленная деформация увеличивается из центра к периферии, расходясь концентрическими окружностями. В данных случаях также видна корреляция распределения расчетной накопленной деформации с распределением измеренной твердости (рис. 6).

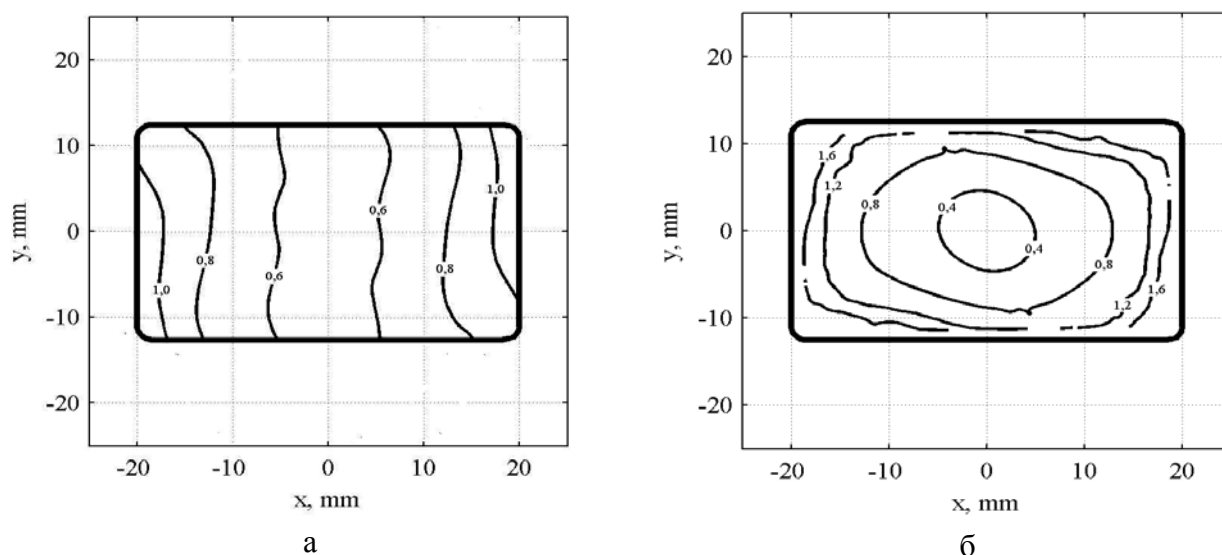


Рис. 8. Распределение накопленной деформации согласно расчету МКЭ:
а – ПВЭ; б – ВЭ

Согласно расчетам МКЭ при прохождении заготовки через зону деформации в случае ПВЭ с подвижными стенками нагрузка на шток на 15 % меньше, чем в случае ПВЭ с неподвижными стенками. Применение подвижных боковых стенок в зоне деформирования ПВЭ возможно и в контейнерах, расположенных до и после указанной зоны. Контакт заготовки с подвижными стенками на обширной поверхности существенно снижает трение и этим позволяет значительно увеличить длину обрабатываемых заготовок.

Оценим давление штока на заготовку для случаев с неподвижными и с подвижными стенками канала. Сила трения о стенки контейнера в общем виде равна:

$$F_c = 2L\tau_c(a+b), \quad (1)$$

где τ_c – напряжение трения в контейнере; a – большая сторона заготовки; b – меньшая сторона заготовки; L – длина заготовки.

Сила, прикладываемая к торцу заготовки равна:

$$F = Pab, \quad (2)$$

где P – давление, на штоке.

Приравняв (1) и (2), получим оценку для давления на штоке в случае с неподвижными стенками канала:

$$P = 2L\tau_c\left(\frac{1}{b} + \frac{1}{a}\right). \quad (3)$$

В случае с подвижными стенками, трение на большей стороне заготовки равно нулю и давление штока P_1 равно:

$$P_1 = \frac{2L\tau_c}{a}. \quad (4)$$

Вычитая (4) из (3), найдем, насколько величина давления в контейнере с подвижными стенками меньше чем в контейнере с неподвижными:

$$\Delta P = P - P_1 = 2\tau_c \frac{L}{b}, \quad (5)$$

где ΔP – разность давлений.

Из выражения (5) следует, что чем длиннее заготовка, тем больше разница в давлениях на шток при одинаковых длинах заготовок для ПВЭ с неподвижными и подвижными стенками. Принимая закон пластического трения $\tau_c = \mu_c \sigma_s$, получаем:

$$\frac{\Delta P}{\sigma_s} = 2\mu_c \frac{L}{b}. \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что уже при $\frac{L}{b} = 5$ и $\mu = 0,25$, разница давлений в контейнерах с неподвижными и подвижными стенками составит $\Delta P = 2,5\sigma_s$.

ВЫВОДЫ

Процесс ПВЭ обеспечивает достаточно хорошую проработку материала, гомогенизацию, выравнивание свойств по объему заготовок. Уровень деформации за один проход ПВЭ практически такой же, как и при обычной ВЭ. Подвижные стенки канала позволяют существенно снизить силовые параметры процесса ПВЭ. Как и ВЭ, ПВЭ перспективна для получения УМЗ-структур и гомогенизации в различных сплавах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Producing Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation* / R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita [et al.] // *JOM*. – 2006 April. – P. 33–39.
2. Эволюция структуры ГЦК монокристаллов при больших пластических деформациях / Н. А. Смирнова, В. И. Левит, В. П. Пилюгин [и др.] // *ФММ*. – 1986. – Т. 61. – № 6. – С. 1170–1177.
3. Пластическая обработка металлов простым сдвигом / В. М. Сегал, В. И. Резников, А. Е. Дробышевский [и др.] // *Металлы*. – 1981. – № 1. – С. 115–123.
4. Salishchev G. A. Formation of Submicrocrystalline Structure in Titanium Alloy VT8 and Its Influence on Mechanical Properties / G. A. Salishchev, O. R. Valiakhmetov, R. M. Galeev // *J. Mater.* – 1993. – Sci. 28. – P. 2898–2902.
5. Novel ultra-high straining process for bulk materials – development of the accumulative roll-bonding (ARB) process / Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji [et al.] // *Acta Mater.* – 1999. – V. 47. – № 2. – P. 579–583.
6. Microstructures and Dislocation Configurations in Nanostructured Cu Processed by Repetitive Corrugation and Straightening / J. Y. Huang, Y. T. Zhu, H. G. Jiang, T. C. Lowe // *Acta Mater.* – 2001. – № 49. – P. 1497–1505.
7. *Proceedings of the Second International Symposium on Ultrafine Grained Materials* / Y. Beygelzimer, D. Orlov, V. Varyukhin, in : Y. T. Zhu, [et al.] (Eds.) // *The Minerals, Metals, and Materials Society, Warrendale, PA*. – 2002. – P. 297–301.
8. Beygelzimer Y. Useful properties of twist extrusion / Y. Beygelzimer, V. Varyukhin, S. Synkov, D. Orlov. // *Materials Science and Engineering*. – 2009. – A 503. – P. 14–17.
9. Бейгельзимер Я. Е. Деформирование длинномерных заготовок путем простого сдвига в плоскости, параллельной их оси / Я. Е. Бейгельзимер, Д. В. Прилепо // *Обработка материалов давлением*. – Краматорск : ДГМА, 2007. – С. 43–46.
10. Pardis N. Deformation behavior in Simple Shear Extrusion (SSE) as a new severe plastic deformation technique / N. Pardis, R. Ebrahimi // *Materials Science and Engineering*. – 2009. – A 527. – P. 355–360.

Бейгельзимер Я. Е. – д-р техн. наук, проф. ДонФТИ НАН Украины;

Прилепо Д. В. – вед. инженер ДонФТИ НАН Украины;

Гришаев В. В. – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник ДонФТИ НАН Украины;

Абрамова Е. А. – аспирант ДонФТИ НАН Украины;

Воеводский С. В. – магистр ДонНТУ НАН Украины.

ДонФТИ – Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина Национальной академии наук Украины, г. Донецк;

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: prilepo@pisem.net