

PACS: 81.40.Lm, 81.40.Pq

В.З. Спусканюк, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ НАЛИЧИИ ЗАСТОЙНОЙ ЗОНЫ

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

Статья поступила в редакцию 28 апреля 2009 года

Методом верхней оценки выполнен анализ процесса равноканального углового прессования (РКУП) заготовки при образовании в матрице застойной зоны. Учтено влияние геометрической характеристики матрицы, трения и упрочнения материала по мере его прохождения через очаг пластической деформации. Минимальное значение верхней оценки получается методом численного решения задачи при заданной кривой упрочнения материала. Приведен пример такого решения для случая РКУП заготовок из сплава АД33.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование, угловая гидроэкструзия, деформация, давление, скорость, мощность

Перспективным направлением современного материаловедения является создание материалов с субмикроструктурой и высоким уровнем функциональных свойств, устойчивых к различным физическим воздействиям [1]. Такие материалы создаются, в частности, с использованием новых методов интенсивной пластической деформации (ИПД). Одним из наиболее развитых методов ИПД является РКУП [2]. Метод широко используется при исследовании эффектов, достигаемых в результате ИПД разнообразных металлов и сплавов. В ряде случаев очевидной становится возможность и целесообразность практического использования этих эффектов, разработки технологий производства изделий, у которых значительно повышается уровень их физико-механических свойств и появляются качественно новые свойства.

Выходу разработок РКУП из лабораторных в производственные условия препятствует ряд причин, главная из которых – нетехнологичность этого метода. При РКУП с увеличением длины заготовок силы трения их о стенки рабочего канала являются причиной значительного повышения давления прессования. Этот недостаток преодолевается при использовании разрабатываемого нами метода угловой гидроэкструзии (УГЭ), согласно которому заготовка выдавливается из рабочего канала через угловую матрицу жидкостью, сжатой до высокого давления [3,4].

Для повышения эффективности преобразования структуры обрабатываемых заготовок необходимо обеспечить наиболее рациональные условия и режимы деформирования. В связи с этим до настоящего времени остается актуальным исследование механики процесса РКУП. В большинстве случаев в известных публикациях анализ процессов бокового выдавливания РКУП методом верхней оценки производился с учетом влияния одного либо двух факторов процесса, таких как трение, угол матрицы, наличие застойной зоны и т.д. [см., напр., 5–9].

Влияние комплекса основных факторов этого процесса на достигаемую деформацию и давление РКУП рассмотрено в [10]. При этом, однако, не лучшим образом учтено трение и упрочнение материала. При анализе процесса РКУП, сопоставлении результатов моделирования и эксперимента использовано усредненное для всего интервала деформаций значение напряжения сдвига материала, принят одинаковый фактор трения на всех участках контакта заготовки с инструментом. Но ведь известно, что напряжение трения на различных участках канала существенно отличается, во всяком случае трение в выходном канале вне зоны деформации при РКУП без противодействия значительно ниже, чем в зоне деформации.

Целью работы является анализ процесса РКУП методом верхней оценки с учетом комплексного влияния геометрических характеристик матрицы, различных условий трения во входном и выходном каналах, упрочнения материала по мере его прохождения через канал. В [11] такой анализ выполнен для случая деформации в матрице с внешним закруглением, в данной работе – для случая деформации в матрице без внешнего угла закругления с образованием при прессовании застойной зоны.

Деформационная модель

Анализ процесса РКУП выполнен с использованием простой деформационной модели, введенной авторами [6] и в последующем использованной в работах [7,10,11]. В этой модели матрица разделена на четыре участка, как показано на рис. 1. На участке I материал в жестком состоянии движется вниз со скоростью V_0 . В деформационной зоне (участок II) материал подвергается непрерывной пластической деформации. Предполагается, что здесь материал движется по концентрическим линиям с постоянным радиусом с центром в точке O . В застойной зоне (участок III) материал неподвижен. На участке IV материал, вышедший из деформационной зоны, движется без какой-либо дополнительной деформации. Участок II отделен от участка I входной поверхностью деформационной зоны Γ_0 , от участка III – поверхностью деформационной зоны Γ_m , а от участка IV – выходной поверхностью деформационной зоны Γ_f . Началом системы прямоугольных координат является точка O , ось x направлена влево, а ось y – вниз. Используется также цилиндрическая система координат (r, θ, z) с началом в точке O . Одинаковыми приняты углы между входной поверхностью Γ_0 и направлением скорости V_0 на

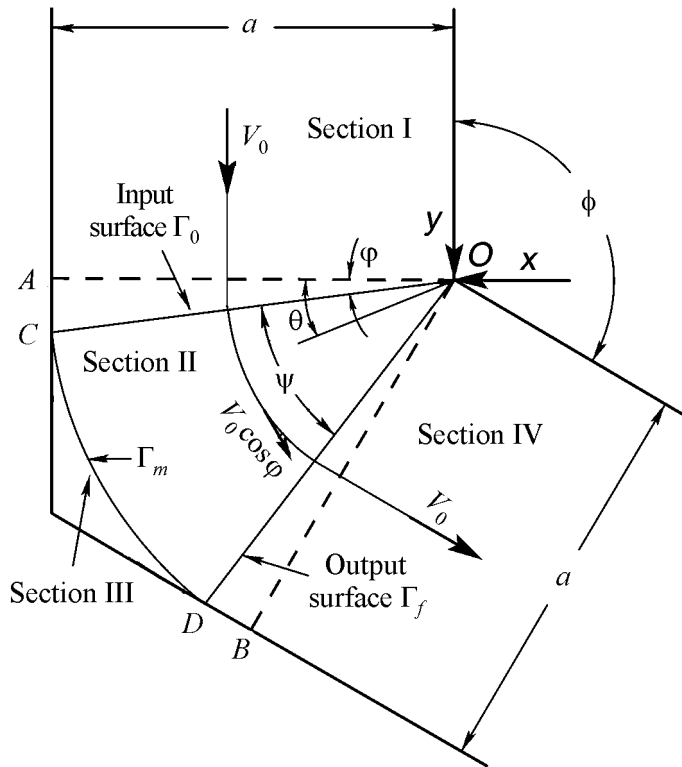


Рис. 1. Деформационная модель

участке I, а также выходной поверхностью Γ_f и направлением скорости V_0 на участке IV, причем они задаются с использованием угла φ .

Материал в деформационной зоне движется с постоянной скоростью, равной $V_0 \cos \varphi$. Поле скоростей в системе цилиндрических координат представлено как

$$v_r = 0, \quad v_\theta = V_0 \cos \varphi, \quad v_z = 0, \quad (1)$$

где v_i ($i = r, \theta, z$) – компоненты поля скоростей в деформационной зоне, z – ось цилиндрической системы координат. На поверхностях входа и выхода скорость претерпевает разрывы, равные

$$|v_0| = |v_f| = V_0 \sin \varphi, \quad (2)$$

где $|v_0|$ – разрыв скорости на входной поверхности, а $|v_f|$ – на выходной поверхности деформационной зоны.

Компонента скорости деформации

$$\dot{\epsilon}_{r\theta} = -\frac{1}{2} \frac{V_0 \cos \varphi}{r}, \quad (3)$$

а другие компоненты равны нулю.

Напряжение трения материала заготовки по поверхности инструмента выражается в виде $\tau_f = m\tau$, где m – фактор трения, τ – напряжение сдвига.

Интенсивности деформаций на входной и выходной поверхностях определяются по зависимостям [6]:

$$\varepsilon_{\Gamma_0} = \varepsilon_{\Gamma_f} = \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right), \quad (4)$$

а в деформационной зоне – по зависимости

$$\varepsilon_m = \frac{\psi}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Суммарная деформация равна

$$\varepsilon_{\text{tot}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[2 \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right) + \psi \right], \quad (6)$$

где ψ – угол деформационной зоны.

Анализ процесса

Мощность деформации выражена как

$$J = FV_0 = Pa^2V_0, \quad (7)$$

где F и P – соответственно сила и давление прессования, a – ширина канала.

Мощность, рассеиваемая в процессе РКУП, определяется аналогично выражению из [10]:

$$\dot{W}_{\text{tot}} = \dot{W}_d + \dot{W}_0 + \dot{W}_f + \dot{W}_m + \dot{W}_{W(AC)} + \dot{W}_{W(BD)} + \dot{W}_{l(0)} + \dot{W}_{l(f)}. \quad (8)$$

Здесь

\dot{W}_d – мощность, рассеиваемая в деформационной зоне:

$$\dot{W}_d = a^2V_0\tau_{sm}\psi, \quad (9)$$

где τ_{sm} – среднее в зоне деформации напряжение сдвига с учетом упрочнения материала. В данной работе оно определяется как $\tau_{sm} = \sqrt{\tau_0\tau_m}$, где τ_0 – напряжение сдвига исходного материала; τ_m – напряжение сдвига материала после пересечения входной поверхности Γ_0 и деформационной зоны;

\dot{W}_0 – мощность диссипации на входной поверхности Γ_0 :

$$\dot{W}_0 = a^2V_0\tau_0 \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right); \quad (10)$$

\dot{W}_f – мощность диссипации на выходной поверхности Γ_f :

$$\dot{W}_f = a^2V_0\tau_m \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right); \quad (11)$$

\dot{W}_m – мощность, рассеиваемая на поверхности контакта между деформационной зоной и застойной зоной материала:

$$\dot{W}_m = a^2V_0\tau_{sm}\psi; \quad (12)$$

$\dot{W}_{W(AC)}$ – мощность, рассеиваемая на поверхности AC :

$$\dot{W}_{W(AC)} = m_1 a^2 V_0 \tau_0 \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right); \quad (13)$$

$\dot{W}_{W(BD)}$ – мощность, рассеиваемая на поверхности BD :

$$\dot{W}_{W(BD)} = m_1 a^2 V_0 \tau_d \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right), \quad (14)$$

где τ_d – напряжение сдвига материала после выхода из деформационной зоны;

$\dot{W}_{l(0)}$, $\dot{W}_{l(f)}$ – мощности, рассеиваемые на поверхностях входного и выходного каналов соответственно:

$$\dot{W}_{l(0)} = 4m_1 a \tau_0 V_0 l_0, \quad (15)$$

$$\dot{W}_{l(f)} = 4m_2 a \tau_d V_0 l_f. \quad (16)$$

Выражения (9)–(16) ряда составляющих уравнения (8) использованы аналогично [10]. Однако в отличие от [10] в данной модели учитывается постепенное упрочнение материала по мере его прохождения через входную границу, пластическую зону и выходную границу этой зоны. Кроме того, приняты различные значения факторов трения, а именно: m_1 – для границ участка I и части участка IV на протяжении DB , m_2 – для оставшейся части границ участка IV. На границе участка II принято $m = 1$.

После подстановки выражений (9)–(16) в (8) получаем

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{tot}} = & a^2 V_0 \tau_{sm} \psi + a^2 V_0 \tau_0 \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right) + a^2 V_0 \tau_m \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right) + a^2 V_0 \tau_{sm} \psi + \\ & + m_1 a^2 V_0 \tau_0 \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right) + m_1 a^2 V_0 \tau_d \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right) + 4m_1 a \tau_0 V_0 l_0 + 4m_2 a \tau_d V_0 l_f. \end{aligned} \quad (17)$$

Если $\bar{l}_0 = \frac{l_0}{a}$ и $\bar{l}_f = \frac{l_f}{a}$, то с учетом (7) давление прессования равно

$$P = [\tau_0(1 + m_1) + \tau_m + m_1 \tau_d] \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right) + 2\tau_{sm} \psi + 4(m_1 \tau_0 \bar{l}_0 + m_2 \tau_d \bar{l}_f). \quad (18)$$

Минимальное значение верхней оценки может быть получено численным методом для процесса РКУП конкретного материала.

Для примера исследован процесс РКУП алюминиевого сплава АД33, кривая упрочнения которого описывается выражением $\sigma = 32 + 218\varepsilon^{0.25}$. В уравнении (18) величины \bar{l}_0 и \bar{l}_f приняты равными 0, поскольку мощности, рассеиваемые на поверхностях входного и выходного каналов, не оказывают влияния на результат минимизации верхней оценки. Минимальные значения полученного решения при различных величинах фактора трения в случае

РКУП с углом $\phi = 90^\circ$ определяли путем исследования функции $f(x) = P'/\tau_0$ (рис. 2), представленной в виде

$$\frac{P'}{\tau_0} = \left[(1 + m_1) + \frac{\tau_m}{\tau_0} + m_1 \frac{\tau_d}{\tau_0} \right] \operatorname{ctg} \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right) + 2 \frac{\tau_{sm}}{\tau_0} \psi, \quad (19)$$

где $x = \psi \in [0; 90]$. Оптимальное значение угла деформационной зоны ψ соответствует минимуму значения функции $f(x) = P'/\tau_0$ при заданной величине фактора трения.

Полученная таким образом зависимость величины угла ψ от фактора трения m_1 для идеально пластичного материала и алюминиевого сплава АД33 представлена на рис. 3,а. С использованием этой зависимости определены величины суммарной деформации ε_{tot} и компоненты давления прессования P'/τ_0 . Зависимости величин ε_{tot} и P'/τ_0 от фактора трения m_1 приведены на рис. 3,б,в.

В случае РКУП упрочняемого материала размеры деформационной зоны больше, чем при обработке идеально пластичного материала. Этот эффект соответствует известным результатам исследования процессов прямого и углового прессования [12,13].

Полученные зависимости обеспечивают более точное представление о закономерностях процесса, позволяют правильно учесть влияние комплекса факторов при верхней оценке деформации и давления РКУП упрочняемого материала. Так, например, неправильная оценка степени упрочнения материала в деформационной зоне приводит к ошибочным представлениям о ее размерах. Если усредненное по деформационной зоне напряжение сдвига τ_{sm} определять как среднеквадратичное ($\tau_{sm} = \sqrt{0.5(\tau_0^2 + \tau_m^2)}$), то размеры деформационной зоны упрочняемого материала оказываются меньшими, чем идеально пластичного.

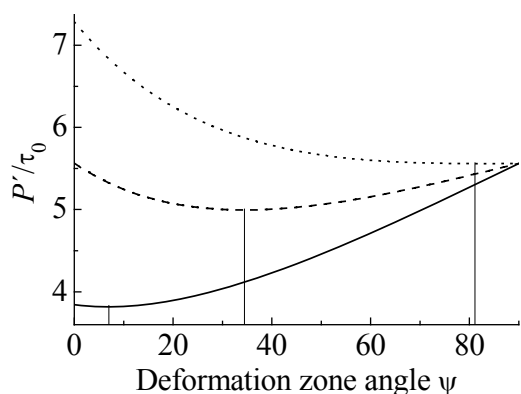


Рис. 2. Характер изменения уровня компоненты давления P'/τ_0 в зависимости от фактора трения m_1 и угла деформационной зоны ψ : — — $m_1 = 0$, - - - - $m_1 = 0.4$, ···· — $m_1 = 0.8$

Относительное давление РКУП P/τ_0 определяется при добавлении к величине P'/τ_0 компоненты P''/τ_0 , соответствующей диссипации энергии на поверхностях входного (выше точки *A*, рис. 1) и выходного (ниже точки *B*) каналов:

$$\frac{P''}{\tau_0} = 4 \left(m_1 \bar{l}_0 + m_2 \frac{\tau_d}{\tau_0} \bar{l}_f \right). \quad (20)$$

При расчетах давления прессования фактор трения m_2 на участке выходного канала ниже точки *B* (см. рис. 1) принимается значительно меньшим, чем m_1 .

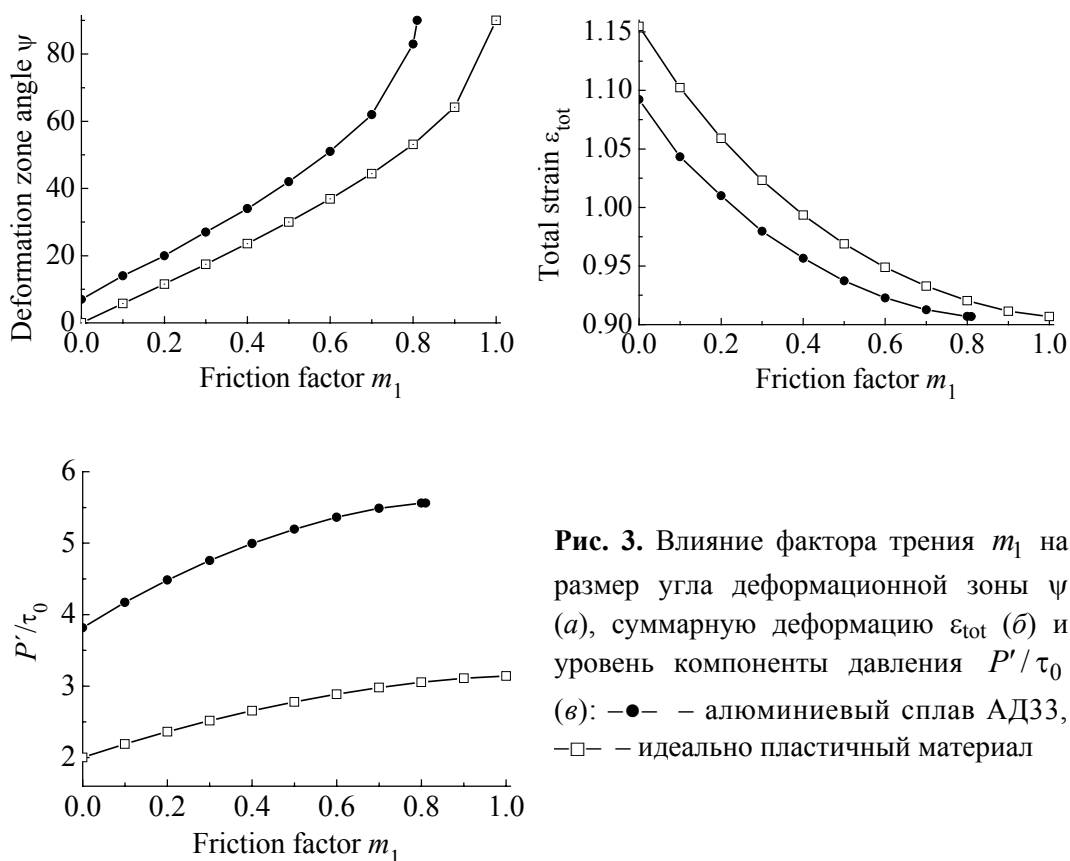


Рис. 3. Влияние фактора трения m_1 на размер угла деформационной зоны ψ (а), суммарную деформацию ϵ_{tot} (б) и уровень компоненты давления P'/τ_0 (в): -●- - алюминиевый сплав АД33, -□- - идеально пластичный материал

Выводы

1. Получена верхняя оценка параметров процесса РКУП заготовки с образованием застойной зоны, учитывающая комплексное влияние трения, геометрической характеристики матрицы, постепенного упрочнения материала по мере его прохождения через очаг пластической деформации.
2. Показана возможность определения минимальной верхней оценки параметров процесса конкретного материала путем численного решения задачи.
3. Полученное решение обеспечивает более корректный, чем в известных работах, учет степени упрочнения материала на различных участках канала, что важно для правильной оценки параметров деформационной зоны, силового режима процесса и эффективности изменения структуры материала при РКУП.

1. Р.З. Валиев, И.В. Александров, Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства, ИКЦ «Академкнига», Москва (2007).
2. В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев, Процессы пластического структурообразования металлов, Наука и техника, Минск (1994).

3. В.З. Спусканюк, Т.Е. Константинова, А.А. Давиденко и др., в сб.: Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні, ДДМА, Краматорськ (2007), с. 37–42.
4. V. Spuskanyuk, A. Spuskanyuk, V. Varyukhin, J. Mater. Proc. Tech. **203**, 305 (2008).
5. П.Д. Чудаков, А.В. Кузнецов, КШП № 3, 3 (1971).
6. J. Alkorta, J.G. Sevillano, J. Mater. Proc. Tech. **141**, 313 (2003).
7. B.S. Altan, G. Purcek, I. Miskioglu, J. Mater. Proc. Tech. **168**, 137 (2005).
8. А.М. Лантев, Е.Ю. Вяль, А.В. Периг, в сб.: Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні, ДДМА, Краматорськ (2006), с. 316–322.
9. M. Reihanian, R. Ebrahimi, M.M. Moshksar, Mater. and Design **30**, 28 (2009).
10. A.R. Eivani, A. Karimi Taheri, Comp. Mater. Sci. **42**, 14 (2008).
11. В.З. Спусканюк, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко, И.М. Коваленко, в сб.: Обработка материалов давлением, ДДМА, Краматорск (2009), с. 50–56.
12. И.Л. Перлин, Л.Х. Райтбарг, Теория пресования металлов, Металлургия, Москва (1976).
13. А.В. Периг, А.М. Лантев, С.В. Подлесный, в сб.: Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, ДДМА, Краматорськ (2008), № 1, с. 128.

В.З. Спусканюк, О.М. Гангало, О.А. Давиденко

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РІВНОКАНАЛЬНОГО КУТОВОГО ПРЕСУВАННЯ ЗАГОТОВКИ ЗА НАЯВНІСТЮ ЗАСТІЙНОЇ ЗОНИ

Методом верхньої оцінки виконано аналіз процесу рівноканального кутового пресування (РККП) заготовки при утворенні в матриці застійної зони. Враховано вплив геометричної характеристики матриці, тертя й зміцнення матеріалу в міру його проходження через вогнище пластичної деформації. Мінімальне значення верхньої оцінки одержане методом чисельного рішення завдання при заданій кривій зміцнення матеріалу. Наведено приклад такого рішення для випадку РККП заготовок зі сплаву АД33.

Ключові слова: рівноканальне кутове пресування, кутова гідроекструзія, деформація, тиск, швидкість, потужність

V.Z. Spuskanyuk, A.N. Gangalo, A.A. Davidenko

ANALYSIS OF EQUAL-CHANNEL ANGULAR EXTRUSION PROCESS IN VIEW OF DEAD ZONE FORMATION

The equal-channel angular extrusion process analysis by an upper bound method was performed with respect to dead metal zone. The effects of die geometry, friction and material strain hardening during passing over deformation zone were considered. Numeric calculation with given stress-strain hardening curve leads to upper bound solution extremum. The example of such solution for equal-channel angular extrusion of aluminum alloy AD33 billet was given.

Keywords: equal-channel angular extrusion, angular hydroextrusion, strain, pressure, velocity, power

Fig. 1. The deformation model

Fig. 2. Character of pressure component P'/τ_0 change versus friction factor m_1 and deformation zone angle ψ : — — $m_1 = 0$, ---- — $m_1 = 0.4$, - - - — $m_1 = 0.8$

Fig. 3. The effect of friction factor m_1 on deformation zone angle ψ (a), total strain ε_{tot} (b) and pressure component P'/τ_0 (c): —●— — aluminum alloy AD33, —□— — perfectly plastic material