

PACS: 81.40.Lm, 81.40.Pq

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

ВЕРХНЯЯ ОЦЕНКА ДАВЛЕНИЯ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

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

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2011 года

Методом верхней оценки выполнен анализ процесса равноканального углового прессования (РКУП) биметаллических заготовок с учетом комплексного влияния геометрии матрицы, условий трения, упрочнения материала. Показано влияние толщины оболочки, свойств материалов оболочки и сердечника на относительное давление прессования.

Ключевые слова: равноканальное угловое прессование, биметалл, оболочка, сердечник, давление, скорость, мощность

Введение

Одним из наиболее перспективных методов интенсивной пластической деформации является РКУП. Метод широко используется при исследовании влияния больших накопленных деформаций на структуру и свойства материалов, пригоден для промышленного применения [1–4]. В [5] показано, что метод РКУП обеспечивает возможность многоциклового пластической деформации не только сплошных, но и составных заготовок, волокнистых композиционных материалов с формированием субмикроструктурной структуры во всех составных элементах. Процесс РКУП биметаллических заготовок эффективно применен, например, для повышения свойств ниобий-титанового сплава [6].

РКУП биметаллических заготовок в экспериментах [5,6] осуществлялось с использованием угловых матриц при значениях $\phi \geq 150^\circ$. В [7] методом компьютерного моделирования процесса установлено, что удовлетворительное вытекание биметаллических заготовок в выходной канал угловой матрицы достигается даже при меньших углах, а именно при $\phi = 110$ и 120° . В [2] приведены результаты РКУП вольфрама в оболочке из стали через угловую матрицу с углом пересечения каналов $\phi = 90$ – 135° .

Приведенные результаты свидетельствуют о возможном эффективном использовании метода РКУП для получения биметаллических изделий с

улучшенной структурой и повышенным уровнем свойств, однако механика процесса РКУП биметаллических заготовок исследована явно недостаточно.

Целью работы является анализ процесса РКУП биметаллических заготовок методом верхней оценки с учетом комплексного влияния геометрических характеристик матрицы, условий трения, упрочнения материала по мере его прохождения через канал.

Принятые условия и допущения

Анализ процесса РКУП биметаллов в матрице с наружным углом закругления ψ выполнен с использованием простой деформационной модели (рис. 1, *a*), введенной в работе [8] и в последующем использованной в [9,10]. Принято, что течение материала оболочки происходит без проскальзывания относительно материала сердечника.

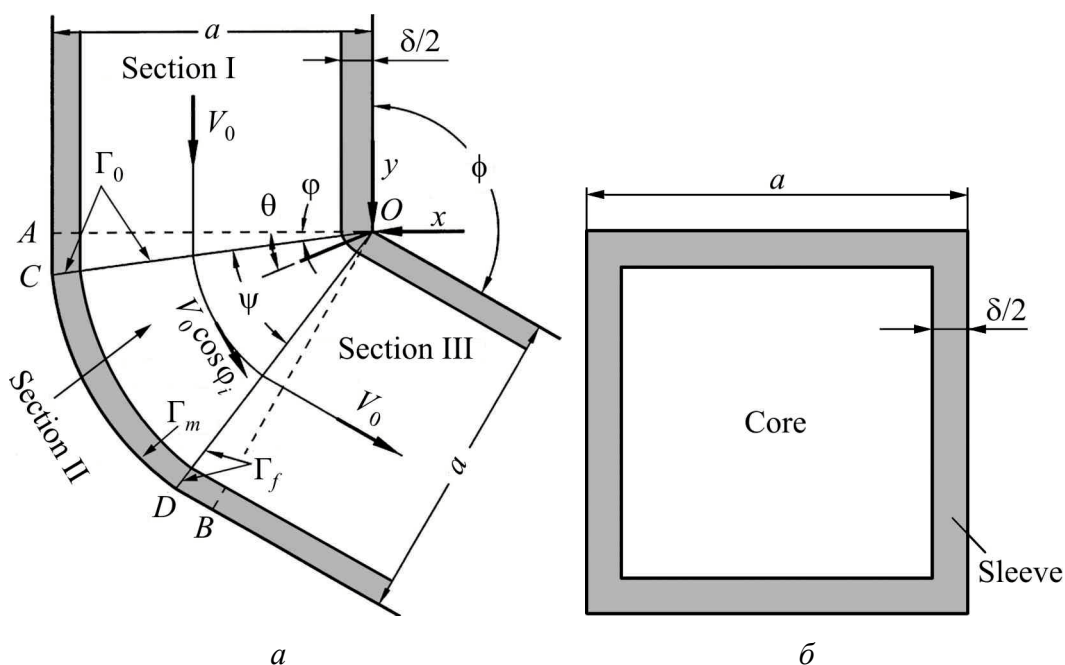


Рис. 1. Равноканальное угловое прессование биметалла: *a* – деформационная модель, *б* – поперечное сечение заготовки

В данной деформационной модели матрица разделена на 3 участка, как показано на рис. 1, *a*. На участке I материал в жестком состоянии движется со скоростью V_0 . На участке II (деформационной зоне) материал биметаллической заготовки подвергается непрерывной пластической деформации. Предполагается, что материал здесь движется по концентрическим линиям с постоянным радиусом с центром в точке O . Принимается, что в этой части матрицы сохраняются величины площадей поперечного сечения канала, сердечника и оболочки, откуда следует, что $\phi + \psi \leq \pi$ (где ϕ – угол матрицы; ψ – угол деформационной зоны). На участке III материал, вышедший из деформационной зоны, движется без какой-либо дополнительной деформации.

Участок II отделен от участка I входной поверхностью деформационной зоны Γ_0 , а от участка III – 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) с началом в точке O . Одинаковыми приняты углы между входной поверхностью Γ_0 и скоростью V_0 на участке I, выходной поверхностью Γ_f и скоростью V_0 на участке III, причем они задаются с использованием угла φ (рис. 1,а).

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 $|v_0|, |v_f|$ – разрывы скорости соответственно на входной и выходной поверхностях деформационной зоны.

Компонента скорости деформации

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

а другие компоненты равны нулю.

Напряжение трения материала оболочки 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 [10]:

$$\bar{\varepsilon}_{s(0)} = \bar{\varepsilon}_{s(f)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg} \varphi \left(\frac{+\psi}{2} \right), \quad (4)$$

а в деформационной зоне

$$\bar{\varepsilon}_d = \frac{\psi}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

Суммарная деформация

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

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, выражена аналогично [11]:

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

где \dot{W}_d , \dot{W}_0 , \dot{W}_f , \dot{W}_m , $\dot{W}_{W(AC)}$, $\dot{W}_{W(BD)}$, $\dot{W}_{l(0)}$, $\dot{W}_{l(f)}$ представляют мощности, рассеиваемые в деформационной зоне, на входной и выходной поверхностях, на поверхности контакта материала с матрицей в деформационной зоне, на поверхностях AC и BD , во входном и выходном каналах соответственно (рис. 1,а). Выражения каждой из составляющих уравнения (8) использованы аналогично [11]. Однако в отличие от [11] в данной модели рассматривается РКУП биметалла, поэтому необходимо учесть влияние наличия пары оболочка–сердечник.

Площадь поперечного сечения (квадратного) заготовки

$$S_{\Sigma} = a^2, \quad (9)$$

где a – сторона квадратного сечения (рис. 1).

Тогда площадь поперечного сечения сердечника

$$S_i = (a - \delta)^2, \quad (10)$$

где $\delta/2$ определяет толщину оболочки. Отсюда площадь поперечного сечения оболочки

$$S_e = S_{\Sigma} - S_i = a^2 - (a - \delta)^2. \quad (11)$$

Для удобства перейдем к относительным величинам. Относительная площадь сердечника

$$\frac{S_i}{S_{\Sigma}} = \frac{(a - \delta)^2}{a^2} = \lambda, \quad (12)$$

а относительная площадь оболочки

$$\frac{S_e}{S_{\Sigma}} = \frac{a^2 - (a - \delta)^2}{a^2} = 1 - \lambda. \quad (13)$$

С использованием формул (9)–(13) получаем

$$S_i = \lambda a^2, \quad (14)$$

$$S_e = (1 - \lambda)a^2. \quad (15)$$

Учитывая выражения (14), (15), получаем мощности диссипации:

– на входной поверхности Γ_0 :

$$\dot{W}_0 = \operatorname{ctg}\left(\frac{\phi + \psi}{2}\right) \left[\tau_{i0} \lambda a^2 + \tau_{e0} (1 - \lambda) a^2 \right], \quad (16)$$

где τ_{i0} , τ_{e0} – напряжение сдвига исходного материала соответственно сердечника и оболочки;

– на выходной поверхности Γ_f :

$$\dot{W}_f = \operatorname{ctg}\left(\frac{\phi + \psi}{2}\right) \left[\tau_{id} \lambda a^2 + \tau_{ed} (1 - \lambda) a^2 \right], \quad (17)$$

где τ_{id} , τ_{ed} – напряжение сдвига деформированного материала соответственно сердечника и оболочки;

– в деформационной зоне:

$$\dot{W}_d = V_0 \psi \left[\bar{\tau}_i \lambda a^2 + \bar{\tau}_e (1 - \lambda) a^2 \right], \quad (18)$$

где $\bar{\tau}_i = \sqrt{\tau_{i0} \tau_{id}}$, $\bar{\tau}_e = \sqrt{\tau_{e0} \tau_{ed}}$ – усредненные значения напряжения сдвига материала соответственно сердечника и оболочки;

– на контактной поверхности матрицы в деформационной зоне:

$$\dot{W}_m = m_1 a^2 V_0 \bar{\tau}_e \psi; \quad (19)$$

– на поверхности AC :

$$\dot{W}_{W(AC)} = m_1 a^2 V_0 \tau_{e0} \operatorname{ctg}\left(\frac{\phi + \psi}{2}\right); \quad (20)$$

– на поверхности BD :

$$\dot{W}_{W(BD)} = m_1 a^2 V_0 \tau_{ed} \operatorname{ctg}\left(\frac{\phi + \psi}{2}\right); \quad (21)$$

– на поверхностях входного и выходного каналов (участки I и III):

$$\dot{W}_{l(0)} = 4m_1 a \tau_{e0} V_0 l_0, \quad (22)$$

$$\dot{W}_{l(f)} = 4m_2 a \tau_{ed} V_0 l_f, \quad (23)$$

где l_0 и l_f – текущие расчетные значения длин контактных поверхностей деформируемого материала с инструментом соответственно во входном и выходном каналах.

Общая мощность рассеивания в процессе РКУП биметаллических заготовок

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\text{tot}} = & \text{ctg}\left(\frac{\phi+\psi}{2}\right)\left[\tau_{i0}\lambda a^2 + \tau_{e0}(1-\lambda)a^2\right] + \text{ctg}\left(\frac{\phi+\psi}{2}\right)\left[\tau_{id}\lambda a^2 + \tau_{ed}(1-\lambda)a^2\right] + \\ & + V_0\psi\left[\bar{\tau}_i\lambda a^2 + \bar{\tau}_e(1-\lambda)a^2\right] + m_1a^2V_0\bar{\tau}_e\psi + m_1a^2V_0\tau_{e0}\text{ctg}\left(\frac{\phi+\psi}{2}\right) + \\ & + m_1a^2V_0\tau_{ed}\text{ctg}\left(\frac{\phi+\psi}{2}\right) + 4m_1a\tau_{e0}V_0l_0 + 4m_2a\tau_{ed}V_0l_f. \end{aligned} \quad (24)$$

С учетом (7) давление прессования

$$\begin{aligned} p = & \left[(\tau_{i0} + \tau_{id})\lambda + (\tau_{e0} + \tau_{ed})(1-\lambda + m_1)\right]\text{ctg}\left(\frac{\phi+\psi}{2}\right) + \\ & + \left[\bar{\tau}_i\lambda + \bar{\tau}_e(1-\lambda + m_1)\right]\psi + \frac{4}{a}(m_1\tau_{e0}l_0 + m_2\tau_{ed}l_f). \end{aligned} \quad (25)$$

Соотношение (25) удобно использовать для интерпретации зависимости относительного давления РКУП от комплексного влияния основных факторов процесса, а именно угла ϕ , угла деформационной зоны ψ , условий трения, толщины оболочки, длины заготовки.

На рис. 2 приведена зависимость относительного давления прессования от фактора трения и свойств материалов пары оболочка–сердечник без учета упрочнения для заготовки с относительной длиной ba . Из рисунка видно, что, хотя увеличение фактора трения приводит к значительному повышению относительного давления прессования, относительное снижение напряжения сдвига материала оболочки вызывает уменьшение влияния фактора трения на величину давления.

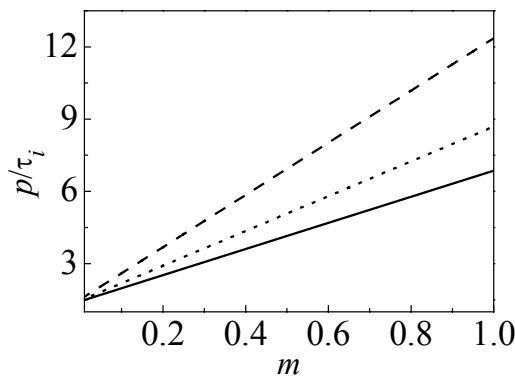


Рис. 2. Зависимость относительного давления прессования от фактора трения и свойств материалов пары оболочка–сердечник τ_i/τ_e при $\phi = 90^\circ$, $\psi = 30^\circ$, $\delta/(2a) = 0.05$; — $\tau_i/\tau_e = 2$, - - - 3 , - · - 4

Зависимость относительного давления прессования от толщины оболочки $\delta/2$ и свойств материалов пары оболочка–сердечник без учета упрочнения для заготовки с относительной длиной ba показана на рис. 3,а. Из рисунка видно, что увеличение толщины оболочки и относительное снижение напряжения сдвига материала оболочки приводят к уменьшению относительного давления прессования. Однако следует отметить, что при увеличении толщины оболочки происходит уменьшение массы сердечника, для компенсации чего необходимо увеличение длины исходной заготовки в $1/\lambda$ раз.

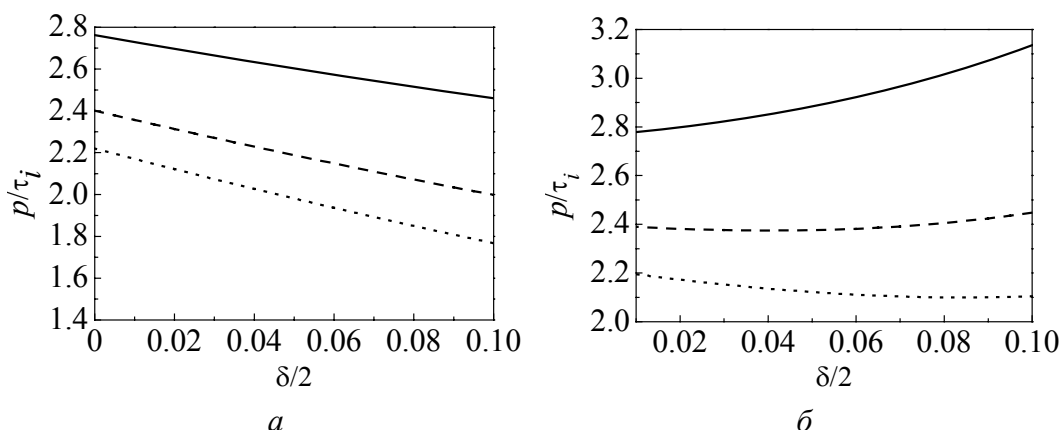


Рис. 3. Зависимость относительного давления прессования от толщины оболочки и свойств материалов пары оболочка–сердечник τ_i/τ_e без учета упрочнения при изменяющемся (а) и постоянном ($\gamma = 6a^3$) (б) объеме сердечника при $\phi = 90^\circ$, $\psi = 30^\circ$, $m = 0.1$; — $\tau_i/\tau_e = 2$, - - - 3, 4

На рис. 3,б приведена зависимость относительного давления прессования от толщины оболочки $\delta/2$ и свойств материалов пары оболочка–сердечник τ_i/τ_e без учета упрочнения при постоянном объеме сердечника, равном $\gamma = 6a$. Из рисунка видно, что в зависимости от свойств материалов пары оболочка–сердечник толщину оболочки следует увеличивать до определенного уровня, в противном случае возможно повышение относительного давления прессования.

Сопоставление с экспериментом

Полученные результаты проверяли на установке для РКУП с углом пересечения каналов $\phi = 150^\circ$. В качестве материала использовали заготовки диаметром 16 mm, длиной 45 mm с титановым сердечником в медной оболочке толщиной 1.5 mm. Биметаллические заготовки были получены путем гидропрессования составных заготовок диаметром 38 mm. Напряжения сдвига материалов, определенные по результатам измерения твердости [12], составили: у титана – 377/442 МПа, у меди – 220/245 МПа. Фактор трения определен на уровне $m = 0.16$. Экспериментально измеренное давление прессования $p = 607$ МПа, рассчитанное по формуле (25) давление $p_{25} = 655$ МПа.

Выводы

1. Впервые разработана модель РКУП биметаллических материалов, которая учитывает влияние геометрических характеристик матрицы, условий трения, упрочнения и толщины оболочки на силовой режим процесса.
2. Установлено, что увеличение отношения напряжений сдвига материалов сердечника и оболочки приводит к уменьшению влияния фактора трения на относительное давление прессования.

3. Показано, что для обработки сердечника заданного объема относительную толщину оболочки можно увеличивать до определенного уровня, в противном случае наблюдается повышение относительного давления прессования.

4. Сопоставление результатов теоретического исследования и экспериментов показало хорошую сходимость: расчетное значение давления РКУП превышает экспериментальное значение на 8%.

1. *В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев*, Процессы пластического структурообразования, Наука і тэхніка, Минск (1994).
2. *Р.З. Валиев, И.В. Александров*, Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства, ИКЦ «Академкнига», Москва (2007).
3. *Z. Horita, T. Fujinami, T.G. Langdon*, Mater. Sci. Eng. **A318**, 34 (2001).
4. *V.M. Segal*, Mater. Sci. Eng. **A386**, 269 (2004).
5. *В.З. Спусканюк, А.Б. Дугадко, И.М. Коваленко, Н.И. Матросов, А.В. Спусканюк, Б.А. Шевченко*, ФТВД **13**, № 3, 85 (2003).
6. *V.A. Beloshenko, T.E. Konstantinova, N.I. Matrosov, V.Z. Spuskanyuk, V.V. Chishko, D. Gajda, A.J. Zaleski, V.P. Dyakonov, R. Puźniak and H. Szymczak*, J. Supercond. Nov. Magn. **22**, 505 (2009).
7. *В.З. Спусканюк, Е.Н. Денисов, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко*, Восточно-Европейский журнал передовых технологий № 6/1 (48), 17 (2010).
8. *J. Alkorta, J.G. Sevillano*, J. Mater. Proc. Tech. **141**, 313 (2003).
9. *B.S. Altan, G. Purcek, I. Miskioglu*, J. Mater. Proc. Tech. **168**, 137 (2005).
10. *A.R. Eivani, Taheri A. Karimi*, J. Mater. Proc. Tech. **182**, 555 (2007).
11. *В.З. Спусканюк, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко, И.М. Коваленко*, Обработка материалов давлением. Сб. науч. трудов, Краматорск № 1 (20), 50 (2009).
12. *Г.Д. Дель*, Определение напряжений в пластической области по распределению твердости, Машиностроение, Москва (1971).

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

ВЕРХНЯ ОЦІНКА ТИСКУ РІВНОКАНАЛЬНОГО КУТОВОГО ПРЕСУВАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ЗАГОТОВОК

Методом верхньої оцінки виконано аналіз процесу рівноканального кутового пресування (РККП) біметалевих заготовок з урахуванням комплексного впливу геометрії матриці, умов тертя, зміцнення матеріалу. Показано вплив товщини оболонки, властивостей матеріалів оболонки й сердечника на відносний тиск пресування.

Ключові слова: рівноканальне кутове пресування, біметал, оболонка, сердечник, тиск, швидкість, потужність

V.Z. Spuskanyuk, A.N. Gangalo, A.A. Davydenko, E.N. Denisov

UPPER BOUND ESTIMATE OF THE PRESSURE OF EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING OF BIMETAL BILLETS

The analysis of equal channel angular pressing (ECAP) process of bimetallic billets due to die geometry, friction condition and material strain hardening complex influence was made using the upper bound solution method. The skin width, skin and core material properties influence on relative pressing pressure was presented.

Keywords: equal channel angular pressing, bimetal, skin, core, pressure, velocity, power

Fig. 1. Equal channel angular pressing of a bimetal: a – deformational model, b – billet cross-section

Fig. 2. Dependence of relative pressing pressure on friction factor and material properties for skin–core τ_i/τ_e with $\phi = 90^\circ$, $\psi = 30^\circ$, $\delta/(2a) = 0.05$; — $\tau_i/\tau_e = 2$, - - - - 3, ---- 4

Fig. 3. Dependence of relative pressing pressure on skin width and material properties for skin–core τ_i/τ_e , nonregistering strain hardening at changing (a) and at constant ($\gamma = 6a^3$) (b) core volume with $\phi = 90^\circ$, $\psi = 30^\circ$, $m = 0.1$; — $\tau_i/\tau_e = 2$, - - - - 3, ---- 4