

Спусканюк В.З., Перькова К.И., Давиденко А.А.

## МЕТОД РАСЧЕТА ДАВЛЕНИЯ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК

Spuskanyuk V.Z., Perkova K.I., Davydenko O.A.

### THE METHOD FOR CALCULATION OF PRESSURE FOR EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING OF BIMETALLIC BILLETS

*Разработан метод расчета давления равноканального углового, в частности многоугольного, прессования биметаллических заготовок. Учитывается комплексное влияние на уровень давления геометрических характеристик матриц, относительной толщины оболочки, фактора трения, упрочнения материала сердечника заготовки. Метод расчета значений давления прессования рекомендуется для приближенной оценки силового режима и эффективности смазочного слоя.*

**Ключевые слова:** деформация сдвига, равноканальное угловое прессование, биметаллическая заготовка, давление, фактор трения.

#### **Введение**

Одним из наиболее перспективных методов интенсивной пластической деформации (ИПД) является равноканальное угловое прессование (РКУП). Метод широко используется при исследовании влияния ИПД на структуру и свойства материалов, пригоден для промышленного применения [1, 2]. Метод равноканального многоугольного прессования (РКМУП) эффективно используется для обработки не только сплошных, но и биметаллических заготовок, обеспечивает возможность многоциклового деформирования и накопления больших пластических деформаций с формированием субмикроструктурной структуры во всех составных элементах [3]. РКМУП биметаллических заготовок эффективно применено для повышения свойств ниобий-титанового сплава [4].

В [3, 4] РКМУП биметаллических заготовок осуществлялось с использованием угловых матриц при значениях  $\Phi \geq 150^\circ$ . В [5] методом компьютерного моделирования процесса РКУП установлено, что удовлетворительное вытекание биметаллических заготовок в выходной канал

угловой матрицы достигается даже при меньших углах, а именно при  $\Phi = 110^\circ$  и  $120^\circ$ . Приведенные результаты свидетельствуют об актуальности исследований механики процесса РКУП биметаллических заготовок и разработке методов прогнозирования параметров процесса.

### Цель

Целью настоящей работы является разработка простого и надежного метода оценки силового режима РКУП биметаллических заготовок с учетом комплексного влияния геометрических характеристик матрицы, относительной толщины оболочки, условий трения и упрочнения деформируемых материалов.

### Математическая модель

#### Принятые допущения

Течение материала оболочки происходит без проскальзывания относительно материала сердечника. Противодавление  $p_0$  создается путем воздействия жестким инструментом на прессуемую заготовку в выходном канале. Методы оценки давления прессования основаны на результатах [3, 6, 7]. Согласно [5] принимается  $\Phi \geq 110^\circ$ .

Схема процесса РКУП биметаллической заготовки через угловую матрицу приведена на рис. 1.

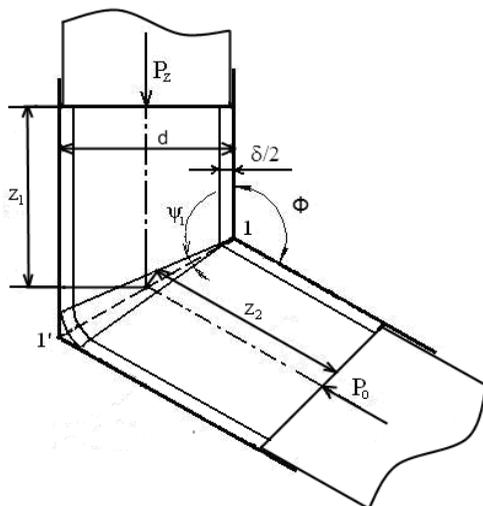


Рис. 1. Схема РКУП биметаллической заготовки

Площадь поперечного сечения биметаллической заготовки равна

$$S_b = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1)$$

где  $d$  – наружный диаметр биметаллической заготовки.

Площадь поперечного сечения сердечника равна

$$S_i = \frac{\pi(d - \delta)^2}{4}, \quad (2)$$

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

$$S_e = \frac{\pi}{4} \{ d^2 - (d - \delta)^2 \}. \quad (3)$$

Для удобства перейдем к относительным величинам. Относительная площадь поперечного сечения сердечника

$$\frac{S_i}{S_b} = \frac{(d - \delta)^2}{d^2} = \lambda, \quad (4)$$

а относительная площадь поперечного сечения оболочки

$$\frac{S_e}{S_b} = 1 - \lambda. \quad (5)$$

С использованием принятых обозначений (1) – (5) получаем

$$S_i = \lambda S_b, \quad (6)$$

$$S_e = (1 - \lambda) S_b. \quad (7)$$

При этом принимается, что  $\lambda \geq 0,8$ .

Напряжение сдвига биметалла может быть представлено с учетом долей материалов сердечника и оболочки в виде

$$k_b = \lambda k_i + (1 - \lambda) k_e, \quad (8)$$

где  $k_i$  и  $k_e$  - напряжения сдвига материалов сердечника и оболочки соответственно.

### Оценка давления РКУП

В процессе РКУП после заполнения материалом канала матрицы до упора в пуансон противодействия давление равно [1]

$$p_z = p_s + p_f + p_0, \quad (9)$$

где  $p_s$  и  $p_f$  - составляющие давления, необходимые для реализации сдвиговой деформации и преодоления сил контактного трения соответственно,

$p_0$  - противодействие.

Составляющая давления, необходимая для осуществления сдвига в зоне деформации, равна

$$p_s = k_b \gamma, \quad (10)$$

где  $\gamma$  - деформация сдвига,

$k_b$  - напряжение сдвига биметалла.

Если,  $p_0 = 0$  то из [8]

$$\gamma = 2ctg \frac{\Phi + \psi}{2} + \psi, \quad (11)$$

где  $\psi$  - угол деформационной зоны,

$$\psi = \pi - \Phi - \arccos(m),$$

$m$  - фактор трения.

Тогда давление РКУП неупрочняемой биметаллической заготовки равно

$$p_z = (2ctg \frac{\Phi + \psi}{2} + \psi) \{(\lambda k_i + (1 - \lambda) k_e)\} + 4mk_e \bar{z} + p_0, \quad (12)$$

где  $\bar{z}$  - относительная длина заготовки во входном и выходном каналах матрицы, равная отношению ее длины к диаметру (либо размеру стороны квадрата),

$p_0$  - противодействие.

Давление РКУП согласно (12) приближенно можно оценить как

$$p_z = 2ctg \frac{\Phi}{2} \{(\lambda k_i + (1 - \lambda) k_e)\} + 4mk_e \bar{z} + p_0, \quad (13)$$

а значение  $k_e$  выразить в виде  $k_e = nk_i$ , где  $0 < n \leq 1$ . Тогда

$$p_z = 2ctg \frac{\Phi}{2} k_i \{\lambda + (1-\lambda)n\} + 4mnk_i \bar{z} + p_0. \quad (14)$$

При  $n = 1$  соотношение (14) вырождается в известное [6], удобное для практического использования, выражение для давления в начальной стадии процесса РКУП монометаллической заготовки

$$p_z = 2ctg \frac{\Phi}{2} k_i + 4mk_i \bar{z} + p_0.$$

Для учёта упрочнения материала сердечника используется усреднённая величина напряжения его сдвига в виде  $k_{im} = \sqrt{k_{i0}k_{id}}$ , где  $k_{i0}$  и  $k_{id}$  - значения сдвигающего напряжения соответственно в исходном состоянии и после деформации. Аналогичным образом можно учесть упрочнение материала оболочки. При малой величине  $S_e = (1-\lambda) S_b$  вклад такой поправки в значение давления РКУП может быть незначительным и учёт упрочнения материала оболочки представляется в этом случае нецелесообразным.

С учётом упрочнения сердечника напряжение сдвига биметалла равно  $k_{bh} = \lambda k_{im} + (1-\lambda)k_e$ , а давление РКУП биметаллической заготовки может быть оценено как

$$p_{zh} = (2ctg \frac{\Phi + \psi}{2} + \psi) \{\lambda k_{im} + (1-\lambda)k_e\} + 4mk_e \bar{z} + p_0. \quad (15)$$

Выражение (15) позволяет достаточно просто оценить уровень давления прессования при малой длине заготовки во входном канале порядка  $\bar{z}_1 < 3$  [1]. Такие условия обеспечиваются при реализации углового гидропрессования, когда до минимума сводится площадь контакта заготовки с инструментом [9].

В противном случае необходимо учитывать неравномерное по длине заготовки во входном канале распределение осевого  $\sigma_z$ , радиального  $\sigma_r$  и контактного  $\tau$  напряжений [1,10]. В этом случае сначала определяется давление на входной границе зоны сдвига у сечения 1-1' в виде

$$p_{zh0} = (2ctg \frac{\Phi + \psi}{2} + \psi) \{ \lambda k_{im} + (1 - \lambda) k_e \} + 4mk_e \bar{z}_2 + p_0, \quad (16)$$

где  $\bar{z}_2$  – относительная длина заготовки в выходном канале матрицы, а затем давление прессования

$$p_{zh} = [ (2ctg \frac{\Phi + \psi}{2} + \psi) \{ \lambda k_{im} + (1 - \lambda) k_e \} + 4mk_e \bar{z}_2 + p_0 ] \exp(4\mu c \bar{z}_1), \quad (17)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения во входном канале,  $c$  – коэффициент бокового (нормального) давления на стенки канала,  $\bar{z}_1$  – относительная длина заготовки во входном канале матрицы.

### Оценка давления РКМУП

При определении давления РКМУП заготовки в S-образной матрице с параллельными каналами рассматривается система сил, действующих на заготовку и инструмент с входным 1, промежуточным 2 и выходным 3 каналами (рис. 2).

Деформация материала осуществляется в двух зонах сдвига, биссектрисы углов которых обозначены линиями 1–1' и 2–2' соответственно. Все величины, относящиеся к зоне сдвига у сечения 1–1', обозначены индексом 1, а относящиеся к зоне у сечения 2–2' – индексом 2. РКМУП осуществляется при углах пересечения каналов  $90^\circ \leq \Phi \leq 150^\circ$ .

После заполнения материалом всех каналов матрицы до упора в пуансон давление определяется также по соотношению (9).

Составляющая давления, необходимая для осуществления сдвига в 1-й и 2-й зонах, равна

$$p_s = k_b (\gamma_1 + \gamma_2), \quad (18)$$

где напряжение сдвига биметалла представляется с учетом долей материалов сердечника и оболочки в виде  $k_b = \lambda k_i + (1 - \lambda) k_e$ ,  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – деформации сдвига в зонах 1–1' и 2–2' соответственно, определяемые по (11).

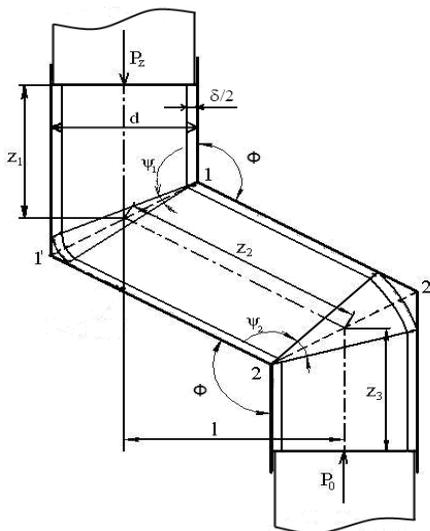


Рис. 2. Схема равноканального углового прессования биметаллической заготовки через S-образную матрицу

Различие величин  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  при параллельных вертикальных каналах может быть обусловлено различными значениями факторов трения  $m_1$  и  $m_2$ .

Составляющая давления, необходимая для преодоления сил трения в каналах, равна [3]

$$p_f = 4k_e \sum_{i=1}^3 m_i \bar{z}_i, \quad (19)$$

где  $\bar{z}_i$  - относительные длины частей заготовки в каналах 1-3 соответственно, равные отношению их длин к диаметру (либо размеру стороны квадрата).

Величина  $z_2$ , зависящая от расстояния между осями параллельных каналов и угла  $\Phi$  (рис. 2), равна

$$z_2 = \frac{l}{\sin(\pi - \Phi)},$$

где  $l$  - расстояние между осями каналов.

Согласно [3] из (8,18,19) получается

$$p_z = \{\lambda k_i + (1-\lambda)k_e\} \sum_{i=1}^2 \gamma_i + 4k_e \sum_{i=1}^3 m_i z_i + p_0, \quad (20)$$

где  $\gamma_i$  - сдвиговая деформация в  $i$ -той зоне сдвига.

При  $z_I > 3$  определяется давление на входной границе первой зоны сдвига в виде

$$p_{z0} = \{\lambda k_i + (1-\lambda)k_e\} \sum_{i=1}^2 \gamma_i + 4k_e \sum_{i=1}^3 m_i z_i + p_0, \quad (21)$$

а затем давление прессования согласно [1]

$$p_z = \left[ \{\lambda k_i + (1-\lambda)k_e\} \sum_{i=1}^2 \gamma_i + 4k_e \sum_{i=1}^3 m_i z_i + p_0 \right] \exp(4\mu c \bar{z}_1). \quad (22)$$

С использованием предлагаемого подхода можно оценить давление РКМУП с учетом упрочнения материала в результате деформации и различных условий контактного трения заготовки о стенки каналов 1-3.

Тогда при  $z_I < 3$  давление равно 
$$p_z = \sum_{i=1}^2 k_{bi} \gamma_i + 4k_e \sum_{i=1}^3 m_i z_i + p_0, \quad (23)$$

где напряжения сдвига биметалла в 1-й и 2-й зонах соответственно равны  $k_{b1} = \lambda \bar{k}_{i1} + (1-\lambda)k_e$ ,  $k_{b2} = \lambda \bar{k}_{i2} + (1-\lambda)k_e$ . Поскольку учитывается упрочнение сердечника, то  $\bar{k}_{i1} = \sqrt{k_{10}} k_{i1}$ ,  $\bar{k}_{i2} = \sqrt{k_{i1}} k_{i2}$ , где  $k_{i1}$  - напряжение сдвига сердечника после деформации  $\gamma_1$  в 1-й зоне, а  $k_{i2}$  - напряжение сдвига после суммарной деформации  $(\gamma_1 + \gamma_2)$  в двух зонах соответственно.

В случае  $z_I > 3$  вначале определяется давление на входной границе первой зоны сдвига в виде

$$p_{z0} = \sum_{i=1}^2 k_{bi} \gamma_i + 4k_e \sum_{i=2}^3 m_i z_i + p_0, \quad (24)$$

а затем давление прессования согласно [1]

$$p_z = \left[ \sum_{i=1}^2 k_{bi} \gamma_i + 4k_e \sum_{i=2}^3 m_i z_i + p_0 \right] \exp(4\mu c \bar{z}_1). \quad (25)$$

Известно, что затраты работы на преодоление сил контактного трения при РКУП могут многократно превышать собственно работу деформации металла. Поэтому теоретические оценки значений давления РКУП полезны для определения эффективности смазочного слоя.

### Выводы

Разработан метод расчета давления равноканального углового и многоуглового прессования биметаллических заготовок. Метод рекомендован для оценки комплексного влияния относительной толщины оболочки (при её величине  $\delta/2 \leq 0.1$ ), геометрических характеристик матриц (при  $\Phi \geq 110^\circ$ ), условий трения и упрочнения материала сердечника. В частности, метод может быть использован для оценки фактора трения по экспериментальным данным давления прессования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сегал В.М. Процессы пластического структурообразования / В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов [и др.] – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.
2. Валиев Р.З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р.З. Валиев, И.В. Александров. - М.: ИКЦ «Академик», 2007. – 398 с.
3. Спусканюк В.З. Особенности равноканальной многоугловой экструзии / В.З. Спусканюк, А.Б. Дугадко, И.М. Коваленко, Н.И. Матросов, А.В. Спусканюк, Б.А. Шевченко // Физика и техника высоких давлений. - 2003. - Т. 13, №3, С. 85-96
4. Спусканюк В.З. Влияние деформации равноканальным многоугловым прессованием и длительной термообработки на фазовый состав сплава Nb-Ti / В.З. Спусканюк, Е.А. Павловская, В.В. Чишко, В.Ю. Дмитренко, Л.Ф. Сенникова, Н.И. Матросов // Физика и техника высоких давлений. – 2005. - Т. 15, №1. - С. 133-138.
5. Спусканюк В.З. Исследование характера течения биметаллических заготовок в процессе РКУП / В.З. Спусканюк, Е.Н. Денисов, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2010.– №6/1(48).– С.17-20.
6. Спусканюк В.З. Прогнозирование силового режима равноканального углового прессования заготовок / В.З. Спусканюк, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко, И.М. Коваленко // Физика и техника высоких давлений. - 2008. – Т. 18, №2. – С. 118-127.
7. Спусканюк В.З. Верхняя оценка равноканального углового прессования биметаллических заготовок / В.З. Спусканюк, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко, Е.Н. Денисов // Физика и техника высоких давлений. - 2012. – Т. 22, №1. – С. 113-121.

8. Segal V.M. Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion / V.M. Segal // Materials Science and Engineering A. – 2003. - V. 345. – P. 36-46.
9. Спусканий В.З. Аналіз процесів рівноканального кутового пресування і кулової гідроекструзії методом верхньої оцінки / В.З Спусканий, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко, І.М. Коваленко // Обробка матеріалів тиском. Сб. науч. трудов. Краматорск. - 2009. - №1 (20). – С. 50-56.
10. Спусканий В.З. Метод розрахунку тиску рівноканального кулового пресування в S-образній матриці / В.З Спусканий, А.Н. Гангало, А.А Давиденко // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля Луганськ. - 2008. – №8 (126) Ч. 2. - С.158-162.

## REFERENCES

1. Segal V.M. Processy plasticheskogo strukturoobrazovaniya / V.M. Segal, V.I. Reznikov, V.I. Kopylov [i dr.] – Minsk: Navuka i tjehnika, 1994. – 232 p.
2. Valiev R.Z. Ob'emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie, struktura i svojstva / R.Z. Valiev, I.V. Aleksandrov. - M.: IKC «Akademkniga», 2007. – 398 p.
3. Spuskanjuk V.Z. Osobennosti ravnokanal'noj mnogouglovoj jekstruzii / V.Z. Spuskanjuk, A.B. Dugadko, I.M. Kovalenko, N.I. Matrosov, A.V. Spuskanjuk, B.A. Shevchenko // Fizika i tehnika vysokih davlenij. - 2003. - V. 13, No3, P. 85-96.
4. Spuskanjuk V.Z. Vlijanie deformacii ravnokanal'nym mnogouglovym pressovanijem i dlitel'noj termoobrabotki na fazovij sostav splava Nb-Ti / V.Z. Spuskanjuk, E.A. Pavlovskaja, V.V. Chishko, V.Ju. Dmitrenko, L.F. Sennikova, N.I. Matrosov // Fizika i tehnika vysokih davlenij. – 2005. - Vol. 15, No 1. - P. 133-138.
5. Spuskanjuk V.Z. Issledovanie haraktera techeniya bimetallicheskih zagotovok v processe RKUP / V.Z. Spuskanjuk, E.N. Denisov, A.N. Gangalo, A.A. Davidenko // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovij tehnologij.- 2010. – No 6/1 (48). – P. 17-20.
6. Spuskanjuk V.Z. Prognozirovanie silovogo rezhima ravnokanal'nogo ugloвого pressovanija zagotovok / V.Z Spuskanjuk, A.N. Gangalo, A.A. Davidenko, I.M. Kovalenko // Fizika i tehnika vysokih davlenij.- 2008.– Vol. 18, No 2. – P. 118-127.
7. Spuskanjuk V.Z. Verhnjaja ocenka ravnokanal'nogo ugloвого pressovanija bimetallicheskih zagotovok / V.Z Spuskanjuk, A.N. Gangalo, A.A. Davidenko, E.N. Denisov // Fizika i tehnika vysokih davlenij. - 2012. – T. 22, №1. – S. 113-121.
8. Segal V.M. Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion / V.M. Segal // Materials Science and Engineering A. – 2003. - V. 345. – P. 36-46.
9. Spuskanjuk V.Z. Analiz processov ravnokanal'nogo ugloвого pressovanija i ugloвого gidrojekstruzii metodom verhnej oцenki / V.Z Spuskanjuk, A.N. Gangalo, A.A. Davidenko, I.M. Kovalenko // Obrabotka materialov davleniem. Sb. nach. trudov. Kramatorsk. - 2009. - No 1 (20). – P. 50-56.
10. Spuskanjuk V.Z. Metod rascheta davlenija ravnokanal'nogo ugloвого pressovanija v S-obraznoj matricе / V.Z Spuskanjuk, A.N. Gangalo, A.A Davidenko // Visnik shidnoukrains'kogo nacional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalja Lugans'k. - 2008. – No 8 (126) Ch. 2. - P.158-162.

*Спусканий В.З., Пєрькова К.І., Давиденко О.А. Метод розрахунку тиску рівноканального кулового пресування біметалевих заготовок.*

Розроблено метод розрахунку тиску рівноканального кутового, зокрема багатокутового, пресування біметалевих заготовок. Враховується комплексний вплив геометричних характеристик матриць, відносної товщини оболонки, умов тертя, зміцнення матеріалу осердя заготовки. Метод розрахунку значень тиску пресування рекомендується для приблизної оцінки силового режиму і ефективності мастильного шару.

**Ключові слова:** деформація зсуву, рівноканальне кутове пресування, біметалічна заготовка, тиск, фактор тертя.

***Spuskanyuk V.Z., Perkova K.I., Davydenko O.A. The method for calculation of pressure for equal channel angular pressing of bimetallic billets.***

*Development of the method for pressure calculation of the equal channel angular pressing of bimetallic billets, accounting of the combined effect of matrix geometric characteristics, cover coat relative thickness, friction conditions and material hardening.*

*The mathematical model of the equal channel angular pressing has developed. The modeling of the equal channel angular pressing process of bimetallic billets has been performed. Analysis of the pressure dependence on the bimetallic billet structure and properties and the pressing condition has been conducted.*

*The pressure analytical dependences on the combined effect of the matrix geometric characteristics, cover coat relative thickness, friction conditions and core material hardening proposed.*

*The new method for calculation of pressure for equal channel angular pressing of bimetallic billets has proposed. This method is recommended for determination of the deformation pressure or the estimation of efficiency of the lubrication action.*

**Keywords:** *shear deformation, equal channel angular pressing, bimetallic billet, pressure, friction factor.*

Спусканюк В.З. - д-р техн. наук, професор, старший научный сотрудник Донецкого физико-технического института им. А.А. Галкина, г. Донецк, Украина.

e-mail: vspusk@ukr.net

Перькова К.И. – аспирант Донецкого физико-технического института им. А.А. Галкина, г. Донецк, Украина.

e-mail: tinka\_10@mail.ru

Давиденко А.А. – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Донецкого физико-технического института им. А.А. Галкина, г. Донецк, Украина.

e-mail: dav76@ukr.net