

УДК 621.777

ВЕРХНЯЯ ОЦЕНКА СИЛОВЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КАНАЛАХ

© 2012 Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, А.Е. Сосенушкин

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Поступила в редакцию 02.11.2012

Статья посвящена определению силовых и деформационных параметров равноканального углового прессования в параллельных каналах с учетом произвольно назначенного радиуса сопряжения каналов. Методом верхней оценки установлены зависимости и характер изменения удельных нагрузок от технологических параметров и условий трения. Проведена оценка деформационных параметров.

Ключевые слова: *равноканальное угловое прессование в параллельных каналах, жесткопластическая схема деформации; годограф скоростей перемещений; радиус сопряжения каналов матрицы; сдвиговые деформации*

Наряду с традиционным способом равноканального углового прессования, предложенного В.М. Сегалом [1] как способ достижения больших деформаций заготовок без изменения их формы сечения, находят применение другие схемы, как, например, способ равноканального углового прессования в параллельных каналах (РКУП ПК), разработанный уфимской научной школой [2, 3]. В соответствии со схемой на рис. 1 за один проход заготовка подвергается деформации, равной сумме степеней деформации в каждом пересечении каналов матрицы. При этом повышается однородность деформированного состояния и коэффициент использования металла до 0,8, т.к. концевая часть заготовки искажается в меньшей степени, по сравнению с традиционным равноканальным угловым прессованием [4]. Оценим силовые параметры равноканального углового прессования в параллельных каналах методом верхней оценки [5, 6]. В качестве допущений примем следующие: материал инструмента является абсолютно жестким; на контактных поверхностях инструмента и заготовки силы трения пропорциональны сопротивлению деформирования σ_s ; материал заготовки идеально жесткопластический переходит в пластическое состояние скачкообразно на границе областей в соответствии с условием пластичности Мизеса, при этом интенсивность нормальных напряжений $\sigma_i = \sigma_s$; постоянная пластичности $k = \sigma_s / \sqrt{3}$.

Сосенушкин Евгений Николаевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: sen@stankin.ru
Яновская Елена Александровна, доцент. E-mail: elena_yanovskaya@bk.ru
Сосенушкин Александр Евгеньевич, магистр. E-mail: yustarius@gmail.com

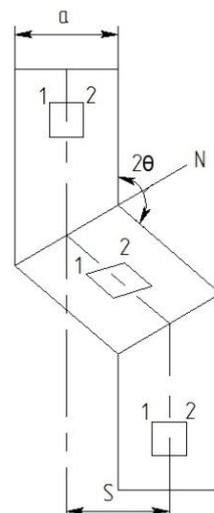


Рис. 1. Схема углового прессования в параллельных каналах: a – ширина канала; S – смещение каналов; 2θ – угол пересечения каналов

Согласно схеме, изображенной на рис. 2, один из очагов деформации, расположенный вблизи линии пересечения каналов матрицы, представляется в виде жестких блоков 1, 2, 3, 4, скользящих относительно друг друга и по границам с жесткой зоной 5. Вдоль границ блоков (треугольных по В. Джонсону) компоненты скоростей перемещений претерпевают разрывы. Внутри каждого блока поле скоростей перемещений однородно с одинаковым вектором скорости для всех точек блока. На этом основании определяют поле скоростей, которое при правильном построении всегда является кинематически возможным. Число и размеры блоков выбирают произвольно. Вдоль границ блоков касательные напряжения максимальны $\tau_k = k$, на

свободных поверхностях $\tau_k=0$, а на контактных подчиняется закону Зибеля [6]

$$\tau_k = 2mk = \frac{2m\sigma_s}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

где m – фактор трения ($0 \leq m \leq 0,5$).

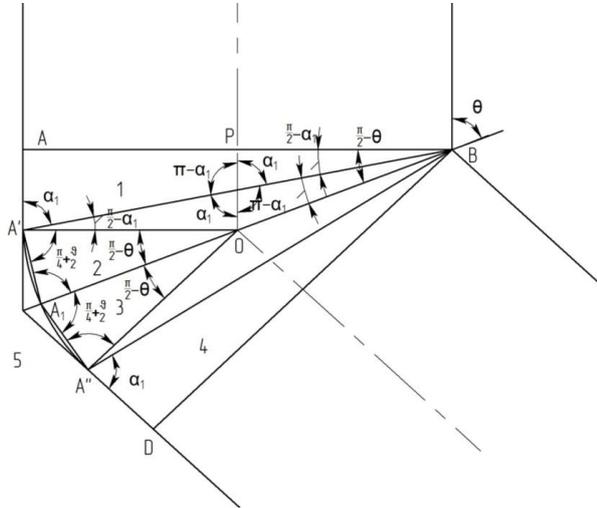


Рис. 2. Схема разбиения очага деформации на жесткие блоки

Поскольку блоки жесткие, мгновенная мощность внутренних сил, включая контактное трение, выражается уравнением [7]:

$$W = \sum \tau_k \dot{u}_{ij} l_{ij} b_{ij}, \quad (2)$$

где \dot{u}_{ij} – скорость относительного скольжения i и j блоков; l_{ij} – длина границы i и j блоков при плоской деформации; b_{ij} – длина проекции площадки контакта в направлении оси y .

Активная мощность, развиваемая деформирующей силой P :

$$W_A = P \dot{u}_0, \quad (3)$$

где \dot{u}_0 – скорость деформирования.

Из равенства мощностей внутренних (2) и внешних (3) сил находим необходимую для прессования силу:

$$P = \frac{\sum \tau_k \dot{u}_{ij} l_{ij} b_{ij}}{\dot{u}_0}. \quad (4)$$

Для случая плоской деформации, обозначив ширину канала матрицы через a , можно выразить удельную силу:

$$p = \frac{\sum \tau_k \dot{u}_{ij} l_{ij}}{\dot{u}_0 a}. \quad (5)$$

Для установления влияния радиуса сопряжения каналов на силовые параметры введем его величину

$$R = a/n; (1 \leq n \leq a) \quad (6)$$

Следует отметить, что попытки учета радиуса сопряжения каналов предпринимались. Работы [8, 9] посвящены компьютерному моделированию силовых и температурных параметров. В большинстве случаев теоретического анализа радиус назначался либо равным ширине канала [3, 10], либо половине ширины [11]. Из геометрических параметров найдем длины границ блоков. Построив годограф скоростей (рис. 3), определим скорости относительных перемещений жестких блоков через известную скорость деформирования v_1 и угол пересечения каналов 2θ . Кроме того, определим нормальные составляющие скоростей перемещений v_{ij}^n . Результаты сведены в табл. 1.

Согласно (2) и (3) запишем уравнение баланса мощностей внутренних и внешних сил с учетом сил трения [12].

$$Pav_1 = k(l_{12}v_{12} + l_{23}v_{23} + l_{34}v_{34} + l_{25}v_{25} + l_{35}v_{35}) + 4mkA'A \cdot v_1 \quad (7)$$

Проведем необходимые преобразования:

$$\frac{Pav_1}{2k} = \left(l_{12}v_{12} + \frac{1}{2}l_{23}v_{23} + l_{25}v_{25} + 2m \cdot \frac{a(n-1)}{n} \cdot \text{ctg} \theta \cdot v_1 \right)$$

В окончательном виде получим удельную силу прессования:

$$\begin{aligned} \frac{p}{2k} = & \sqrt{\frac{2n-1}{n} + \frac{(n-1)^2}{n^2 \sin^2 \theta}} \cdot \left(\cos \arctg \frac{ntg \theta}{n-1} + \sin \arctg \frac{ntg \theta}{n-1} \right) + \\ & \cdot \left(1 - \frac{2}{\text{tg} \left(\frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg \theta}{n-1} \right) + 1} \right) + \\ & + \left(\frac{1}{2n} + \frac{1}{2 \sin \theta} - \frac{1}{2n \sin \theta} \right) \cdot \sin \arctg \frac{ntg \theta}{n-1} \cdot \\ & \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg \theta}{n-1} \right) \cdot \frac{1}{\cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{2} \right)} + \\ & + \frac{\sqrt{2}}{n} \cdot \sqrt{1 + \sin \theta} \cdot \sin \arctg \frac{ntg \theta}{n-1} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg \theta}{n-1} \right) + \\ & + 2m \cdot \frac{n-1}{n} \cdot \text{ctg} \theta \end{aligned} \quad (8)$$

Варьируя параметрами, входящими в зависимость (8), такими, как n , влияющий на значение радиуса сопряжения каналов, m -фактор трения, и θ – половина угла пересечения каналов, были получены результаты, представленные на рис. 4.

Таблица 1. Параметры линий разрыва и скоростей перемещений

Границы $i-j$	l_{ij}	v_{ij}	v_{ij}^n
1-2	$\frac{a}{n \sin \theta} \cdot \sqrt{(2n-1) \sin^2 \theta + (n-1)^2}$	$v_1 \left(\begin{array}{l} \cos \arctg \frac{ntg\theta}{n-1} + \sin \arctg \frac{ntg\theta}{n-1} \\ \cdot \frac{tg\left(\frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg\theta}{n-1}\right) - 1}{tg\left(\frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg\theta}{n-1}\right) + 1} \end{array} \right)$	$v_1 \sin \left[\arctg \left(\frac{n}{n-1} tg\theta \right) \right]$
1-5	$actg \alpha = \frac{a(n-1)}{n} \cdot ctg \theta$	v_1	0
2-3	$\frac{a(\sin \theta + n-1)}{n \sin \theta}$	$v_1 \sin \arctg \frac{ntg\theta}{n-1} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg\theta}{n-1} \right) \cdot \frac{1}{\cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} \right)}$	$v_1 \sin \left[\arctg \left(\frac{n}{n-1} tg\theta \right) \right] \cdot \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} - \arctg \left[\left(\frac{n}{n-1} tg\theta \right) \right] \right)$
2-5	$\frac{a}{n} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \sin \theta}$	$v_1 \sin \arctg \left(\frac{ntg\theta}{n-1} \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg\theta}{n-1} \right)$	0
3-4	$\frac{a}{n \sin \theta} \cdot \sqrt{(2n-1) \sin^2 \theta + (n-1)^2}$	$v_1 \left(\begin{array}{l} \cos \arctg \frac{ntg\theta}{n-1} + \sin \arctg \frac{ntg\theta}{n-1} \\ \cdot \frac{tg\left(\frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg\theta}{n-1}\right) - 1}{tg\left(\frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg\theta}{n-1}\right) + 1} \end{array} \right)$	0
3-5	$\frac{a}{n} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{1 + \sin \theta}$	$v_1 \sin \arctg \left(\frac{ntg\theta}{n-1} \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg\theta}{n-1} \right)$	0
4-5	$actg \alpha = \frac{a(n-1)}{n} \cdot ctg \theta$	v_1	$v_1 \sin \left[\arctg \left(\frac{n}{n-1} tg\theta \right) \right]$

При ширине канала матрицы $a=10$ мм, одинаковом радиусе сопряжения каналов ($R=2$) увеличение фактора трения приводит к росту относительной силы прессования $p/2k$; при одинаковом факторе трения ($m=0,15$) увеличение радиуса сопряжения каналов способствует уменьшению удельной силы. Оценим деформированное состояние металла заготовки. Суммарная деформация сдвига складывается из сдвиговых деформаций на линиях разрыва скоростей:

$$\gamma = \gamma_{12} + \gamma_{23} + \gamma_{34}; \quad (9)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{v_{ij}}{v_{ij}^n} \quad (10)$$

$$\gamma_{12} = \frac{n-1}{ntg\theta} + \frac{tg\left(\frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg\theta}{n-1}\right) - 1}{tg\left(\frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg\theta}{n-1}\right) + 1}; \quad \gamma_{23} = \frac{2}{\cos \frac{\theta}{2}} \quad (11)$$

Итак, суммарная деформация сдвига с учетом двух очагов деформации:

$$\gamma = 2 \left[\frac{n-1}{ntg\theta} + 1 - \frac{2}{tg\left(\frac{\theta}{2} - \arctg \frac{ntg\theta}{n-1}\right) + 1} \right] + \frac{2}{\cos \frac{\theta}{2}} \quad (12)$$

Интенсивность пластических деформаций найдем из соотношения:

$$\varepsilon_i = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

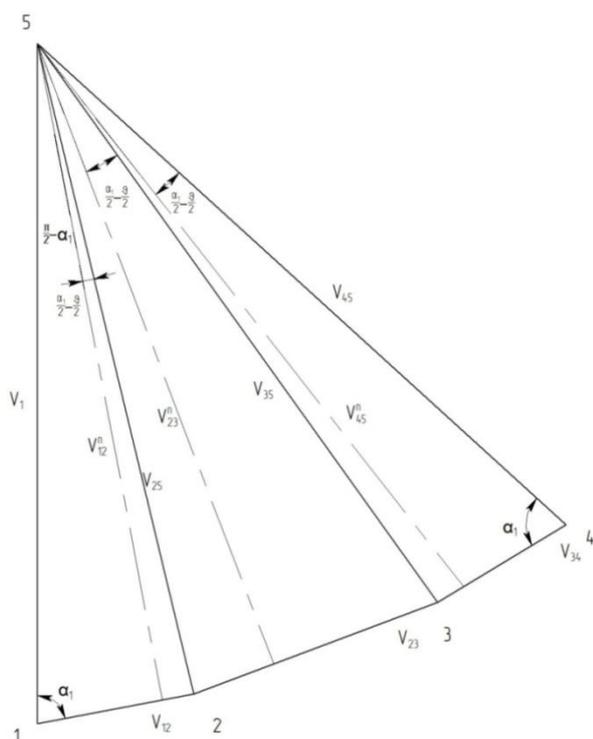


Рис. 3. Голограф скоростей

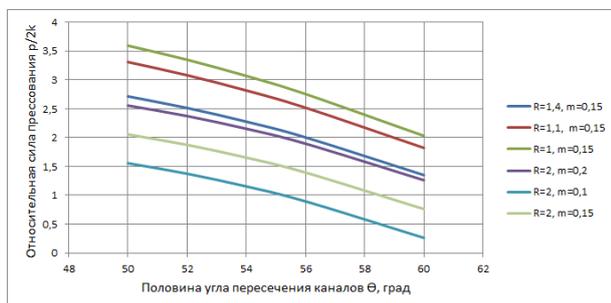
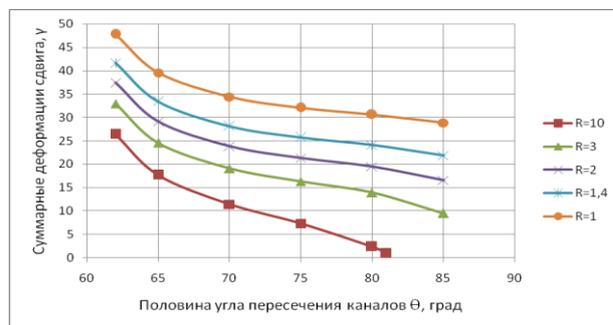


Рис. 4. Изменение относительной силы прессования от основных технологических параметров

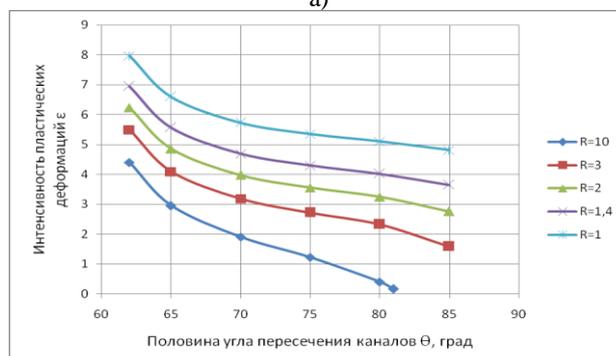
Рис. 5 иллюстрирует изменение суммарной сдвиговой деформации (а) и интенсивности накопленной деформации (б) за цикл обработки. Из графика видно, что с увеличением радиуса сопряжения каналов матрицы, суммарные сдвиговые деформации уменьшаются. Это объясняется изменением характера деформации в сторону изгиба заготовки при увеличенных радиусах сопряжения. Обратная картина наблюдается в изменении интенсивности накопленных деформаций, здесь при увеличении радиуса сопряжения каналов этот показатель деформированного состояния уменьшается.

Выводы: установлена взаимосвязь и теоретически обоснована зависимость между значениями таких геометрических параметров, как радиус сопряжения и угол пересечения каналов

матрицы, и энергосиловыми параметрами технологического процесса равноканального углового прессования, также выявлено влияние перечисленных параметров на характеристики деформированного состояния прессуемой заготовки.



а)



б)

Рис. 5. Изменение суммарной сдвиговой деформации (а) и интенсивности накопленной деформации (б) за цикл прессования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Сегал, В.М.* Процессы пластического структурообразования металлов / *В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов* и др. – Минск: Наука и техника, 1994. 232 с.
2. Патент 218314 РФ. Устройство для обработки металлов давлением / *Г.И. Рааб, Г.В. Кулясов, В.А. Полозовский, Р.З. Валиев*. Опубликовано 20.04.2002.
3. *Боткин, А.В.* Интенсивная пластическая деформация цилиндрической заготовки из сплава 6061 равноканальным угловым прессованием в параллельных каналах / *А.В. Боткин, М.Ю. Мурашкин, Г.И. Рааб, Р.З. Валиев* // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2009. №4. С. 33-38.
4. *Сосенушкин, Е.Н.* Экспериментальная проверка адекватности компьютерного моделирования процесса равноканального углового прессования / *Е.Н. Сосенушкин, Л.М. Овечкин, А.Е. Сосенушкин* // Состояние, проблемы и перспективы развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств. – Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2009. С. 169-174.
5. *Сосенушкин, А.Е.* Математическое моделирование равноканального углового прессования / *А.Е. Сосенушкин, А.Э. Артес, Е.Н. Сосенушкин* // Технология машиностроения. 2011. №12. С. 53-56.

6. *Періг, О.В.* Застосування методу верхньої оцінки методу кінцевих елементів для аналізу процесу ріоканального кутового пресування через матрицю із закруглену зовнішню стінкою кута сполучення каналів / *О.В. Періг, С.О. Короткий, О.М. Лантєв, С.В. Подлесний* // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении: Тематич. сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2008. С. 94-98.
7. *Сторожев, М.В.* Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов / *М.В. Сторожев, Е.А. Попов*. – М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
8. *Сосенушкин, Е.Н.* Совершенствование процессов интенсивной пластической деформации / *Е.Н. Сосенушкин, Л.М. Овечкин, А.Е. Сосенушкин* // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. №1 (18). С. 22-25.
9. *Сосенушкин, Е.Н.* Температурная интенсификация процесса равноканального углового прессования в параллельных каналах / *Е.Н. Сосенушкин, В.В. Белокопытов, А.Е. Сосенушкин* // В сб. докладов и научных статей «Перспективы инновационного и конкурентоспособного развития кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств». – Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2012. С. 271-279.
10. *Сосенушкин, Е.Н.* Оценка силовых параметров и деформационного состояния заготовки при равноканальном угловом прессовании / *Е.Н. Сосенушкин, А.Е. Сосенушкин* // Труды международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии». – СПб: Политехнический университет, 2011. С. 233-235.
11. *Сосенушкин, А.Е.* Силовые и деформационные параметры равноканального углового прессования в параллельных каналах / Материалы 1-го тура студенческой научно-практической конференции АИТ-2012. –М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2012. С. 35-39.
12. *Sosenushkin, A.E.* Simulation of the Equal Channel Angular Extrusion technology / *A.E. Sosenushkin, E.N. Sosenushkin* // IX International congress machines, technologies, materials 2012. September 19- 21 2012 Varna, Bulgaria. – P. 110-112.

UPPER RATE OF POWER AND DEFORMATION PARAMETERS OF EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING IN PARALLEL CHANNELS

© 2012 E.N. Sosenushkin, E.A. Yanovskaya, A.E. Sosenushkin

Moscow State Technological University "STANKIN"

Article is devoted to determination the power and deformation parameters of equal channel angular pressing in parallel channels taking into account any way appointed radius of channels conjugation. By the method of upper rate it was established dependences and nature of change the specific loadings from technological parameters and friction conditions. The assessment of deformation parameters is carried out.

Key words: *equal channel angular pressing in parallel channels, hard-plastic scheme of deformation; hodograph of speeds movings; radius of conjugation the matrix channels; shift deformations*

Evgeniy Sosenushkin, Doctor of Technical Sciences, Professor.

E-mail: sen@stankin.ru

Elena Yanovskaya, Associate Professor. E-mail:

elena_yanovskaya@bk.ru

Alexander Sosenushkin, Master. E-mail: yustarius@gmail.com