# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ, СИЛОВЫХ ПАРМЕТРОВ И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ.

Александр Евгеньевич Сосенушкин

*Студент 4 курса,*
*кафедра «Системы пластического деформирования»,*
*Московский государственный технологический университет «Станкин»*

*Научный руководитель: А.Э. Артес,*
*доктор технических наук, профессор кафедры «Системы пластического деформирования»*

Повышенный интерес к конструкционным металлам с наноструктурой дал новый импульс развития технологий интенсивной пластической деформации. Одним из таких процессов, обеспечивающим интенсивное измельчение зерна, является равноканальное угловое прессование (РКУП). Процесс позволяет деформировать заготовки по схеме простого сдвига [1] при прохождении зоны пересечения каналов матрицы с равным поперечным сечением, но расположенным под определённым углом. Геометрия инструмента в сочетании со схемой напряженно-деформированного состояния позволяет при многократном повторении процесса проталкивания заготовки обеспечить высокие значения накопленных деформаций, необходимых для формирования ультрамелкозернистой структуры с обеспечением повышенного уровня механических характеристик [2].

Наиболее значимыми технологическими характеристиками являются: маршрут прессования; число переходов деформирования; температурные условия; условия трения; угол и радиус сопряжения каналов; энерго-силовые параметры [3].

В работе проведён теоретический анализ технологического процесса РКУП энергетическими методом верхней оценки, который предусматривает жестко-плачтическую схематизацию очага деформации с разделением на треугольные жесткие области.

При этом действительное поле линий скольжений заменяют полем, состоящим из системы прямолинейных отрезков, образующих треугольник. Вдоль границ блоков компоненты скоростей перемещений претерпевают разрывы. Внутри каждого блока поле линий скоростей однородно, т.е. вектор скоростей для всех точек рассматриваемого блока один и тот же. Правильно построенное на этом основании поле скоростей всегда является кинематически возможным. Число и размеры треугольных блоков выбирают произвольно.

Касательные напряжения вдоль границ блоков, возникающие при скольжении, принимаются максимальными $\tau=k$, на свободных поверхностях $\tau=0$, а на контактных поверхностях они изменяются в пределах $2m\,k<\tau<k$ ($m$–фактор трения; $k$ – постоянная пластичности).

Поскольку блоки приняты жесткими, мгновенная мощность внутренних сил, включая контактное трение, выражается уравнением [4]:

$$W=\sum_i \tau_i \dot{U}_i l_i b_i \ , \qquad (1)$$

где $\dot{U}$ – скорость скольжения вдоль границ;
$l$ – длина линий разрыва скоростей;
$b$ – длина проекции площадки контакта в направлении оси $Y$.

Мощность, развиваемая деформирующей силой $P$:

$$W_A = P \times \dot{U}_1 \ , \qquad (2)$$

где $\dot{U}_1$ - скорость движения пуансона (скорость деформирования).

Приравнивая выражения (1) и (2) и решая относительно $P$, получим:

$$P = \frac{\sum_i \tau_i \dot{U}_i l_i b_i}{\dot{U}_1} \ . \qquad (3)$$

Согласно принятым положениям представим процесс РКУП как следствие взаимного перемещения жестких блоков в виде треугольников.

Уравнение баланса мощностей внешних и внутренних сил запишем в виде [5]:

$$Pa\dot{U}_1 = k(l_{12}\dot{U}_{12} + l_{23}\dot{U}_{23} + l_{24}\dot{U}_{24}) + 2\tau(a-R)\dot{U}_1 \, , \qquad (4)$$

где $l_{ij}$; $\dot{U}_{ij}$ - длины границ блоков i и j и скорости их взаимного перемещения.

Выразив линейные размеры в формуле (4) через известные геометрические параметры, а скорости - через заданную скорость инструмента $\dot{U}_1$, и подставив их, получим:

$$pa\dot{U}_1 = k\left\{ \begin{aligned} & 2\frac{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}}{2}\dot{U}_1(\cos\theta \cdot tg\frac{\varphi}{2} + \sin\theta) + R\frac{\pi}{2} \times \\ & \times \frac{\cos\left[\frac{\pi}{4} - \arcsin(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}})\right]\dot{U}_1 \times \sqrt{8a(a-R)+3R^2}}{2\sqrt{2}(a-\frac{R}{2})} \end{aligned} \right\} + 4mk(a-R)\dot{U}_1 .$$

Разделим на $2\dot{U}_1 ka$:

$$\frac{p}{2k} = \frac{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}}{2a}\left\{(\cos\theta \cdot tg\frac{\varphi}{2} + \sin\theta) + \frac{\pi}{4}\frac{R}{\sqrt{2}(a-\frac{R}{a})} \times \cos\left[\frac{\pi}{4} - \arcsin\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}}\right]\right\} +$$

$$+ 2m(1-\frac{a}{R}).$$

После подстановки тригонометрических функций углов $\theta$ и $\frac{\varphi}{2}$ и значений перменной $\frac{R}{a} = b$получим в окончательном виде уравненине для определения безразмерной силы:

$$\frac{p}{2k} = \sqrt{2(1-b)+\frac{3}{4}b^2} \times \left\{ \begin{aligned} & \cos\left[\frac{\pi}{4} - \arcsin\left(\frac{\frac{\sqrt{2}}{2}b}{\sqrt{2(1-b)+\frac{3}{4}b^2}}\right)\right] \times \frac{b}{2(1-\frac{b}{2})} \times \left[1 + \frac{\pi}{2\sqrt{2}}\right] + \\ & + \sin\left[\frac{\pi}{4} - \arcsin\left(\frac{\frac{\sqrt{2}}{2}b}{\sqrt{2(1-b)+\frac{3}{4}b^2}}\right)\right] \end{aligned} \right\} + 2m(1-b). \qquad (5)$$

Анализ напряженного состояния по разработанной математической модели приводит к следующим оценкам. Выявлен характер изменения относительного давления $p/2k$, действующего на торец пуансона, в зависимости от относительного радиуса закругления канала $R/a$. Установлено влияние фактора трения на значения безразмерного давления. Увеличение фактора трения приводит к интенсивному росту безразмерного давления на инструмент со стороны заготовки.

Оценим величину суммарной сдвиговой деформации γ, составляющими которой являются деформации сдвига на линиях разрыва скоростей FC и GC:

$$\gamma = \gamma_{12} + \gamma_{23}. \qquad (6)$$

Согласно рекомендации авторов [6]:

$$\gamma_{ij} = \frac{\dot{U}_{ij}}{\dot{U}_{ij}^{n}}. \qquad (7)$$

Подставив значения скоростей перемещений получим формулы для определения полей деформаций:

$$\gamma = 2\left\{\frac{R}{2a-R} + tg\left[\frac{\pi}{4} - \arcsin\left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}}\right)\right]\right\}. \qquad (8)$$

Эквивалентные пластические деформации при РКУП

$$\varepsilon_e = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}}\left\{\frac{R}{2a-R} + tg\left[\frac{\pi}{4} - \arcsin\left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}}\right)\right]\right\}. \qquad (9)$$

Суммарные деформации сдвига $\gamma$ и эквивалентные пластические деформации $\varepsilon_e$ зависят от геометрических параметров канала матрицы.

*Выводы.*

1. Разработанная математическая модель, основанная на энергетическом методе верхней оценки, даёт представление о величине и характере изменения силовых параметров процесса равноканального углового прессования.

2. Выявлена закономерность изменения деформированного состояния заготовки от относительного радиуса закругления канала матрицы, которая заключается в том, что при увеличении радиуса R/a увеличиваются значения суммарной сдвиговой деформации и интенсивности плачтических деформаций.

**Литература**

1. *Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. и др.* Процессы пластического структурообразования металлов. - Минск: Наука и техника, 1994. – 232 с.

2. *Нургалеева В.В., Семенова И.П., Рааб Г.И., Валеев Р.З.* Влияние равноканального углового прессования на формирование ултрамелкозернистой структуры и механичиеские свойства сплава Ti-6Al-7Nb, применяемого в медицине. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением – 2008.– №11. – С. 28-33.

3. *Овечкин Л.М.* Исследование процесса равноканального углового прессования. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. - 2010. - №6. - С. 30-31.

4. *Сторожев М.В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

5. *Лаптев А.М., Вяль Е.Ю., Периг А.В.* Анализ равноканального углового прессования методом жестких блоков. /Совершенствование процессов и оборудования обработки металлов давлением в металлургии и машиностроении: Тематич. сб. научн. тр. – Краматорск: ДГМА, 2006. - С. 316-322.

6. *Джонсон В., Кудо Х.* Механика процесса выдавливания металла. - М.: Металлургия, 1965. – 174 с.