

УДК 621.777

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ТЕЧЕНИЯ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ.

Сосенушкин Александр Евгеньевич,

Студент 4 курса,

кафедра «Системы пластического деформирования»,

Московский государственный технологический университет «Станкин»

Научный руководитель: Артес А.Э.,

доктор технических наук, профессор кафедры «Системы пластического деформирования»

Одним из перспективных методов пластического деформирования, обеспечивающим интенсивное измельчение зерна и достижение значительных пластических деформаций без разрушения заготовки, является равноканальное угловое прессование (РКУП).

При обработке этим методом реализуется пластическая деформация заготовки по схеме простого сдвига [1], когда она проходит через зону сопряжения пересекающихся под определённым углом каналов равного поперечного сечения (рис. 1). Такая геометрия инструмента и схема напряженно-деформированного состояния позволяют при многократном проталкивании заготовки достигать высоких степеней деформации, создавая условия, необходимые для формирования ультрамелкозернистой структуры с обеспечением повышенного уровня механических свойств заготовки [2].

Наиболее важными технологическими характеристиками являются: маршрут прессования, число переходов деформирования, температурные условия, угол и радиус сопряжения каналов, энерго-силовые характеристики [3].

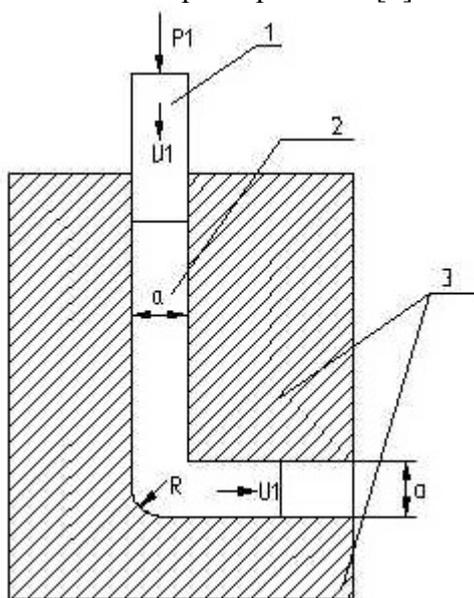


Рис. 1. Схема технологического процесса равноканального углового прессования:

1 - пуансон, 2 - заготовка, 3 - матрица с пересекающимися каналами равного поперечного сечения.

Новым импульсом в развитии технологии РКУП послужил повышенный интерес к конструкционным материалам с нанокристаллической структурой. Несмотря на

относительную простоту реализации, РКУП всё ещё не может поменять статус лабораторной технологии и перейти в условия реального производства. Основными причинами, тормозящими этот процесс, являются невозможность, в большинстве случаев, организовать непрерывность процесса прессования заготовок, поэтому производительность невысока; ограниченность длины заготовок, что существенно уменьшает коэффициент использования металла, по данным работы [4] $KИМ=0,6\div 0,8$; для получения высоких значений пластических деформаций, от которых зависят структура и уникальность комплекса свойств, необходимо многократное повторение процесса для одной и той же заготовки, что также негативно влияет на производительность.

Поскольку процесс РКУП сопровождается высокими удельными нагрузками, действующими на заготовку и инструмент, представляется важным определять энерго-силовые параметры.

Теоретический анализ может быть проведён одним из известных методов, так, например, в работах [1, 5, 6] показана эффективность метода линий скольжения, который является достаточно точным в рамках принятых ограничений о схеме плоской деформации и об идеальной пластичности материала. Поскольку реальные условия связаны с упрочнением металла, то его реологическое поведение неизбежно будет отличаться от идеально пластичного. При проектировании и изготовлении инструмента места пересечения каналов сопрягаются радиусами во избежание концентрации напряжений и облегчения течения металла. Это также затрудняет применение метода линий скольжения. Поэтому в последнее время всё больше исследователей проводит анализ процесса РКУП методом конечных элементов [4, 7]. В этом случае достоверность результатов зависит от правильности задания начальных и граничных условий, совершенства баз данных применяемых программных сред.

Альтернативным вариантом теоретического анализа процесса РКУП является энергетический метод верхней оценки, основанный на схематизации объёма очага деформации жесткими (недеформируемыми) блоками, треугольными в соответствии с работой [8]. Скольжение блоков осуществляется относительно друг друга и по границам с жесткой зоной. 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.

Поскольку блоки приняты жесткими, мгновенная мощность внутренних сил, включая контактное трение, выражается уравнением [9]:

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

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 :

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

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

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

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

Согласно принятым положениям представим процесс РКУП как следствие взаимного перемещения жестких блоков в виде треугольников 1, 2, 3, показанных на рис. 2а.

Застойная зона в угловой части канала обозначена блоком 4, одна из сторон которой представляет собой дугу с радиусом R закругления канала. В соответствии с расчетной схемой построим годограф скоростей перемещений плоских блоков, показанный на рис. 2б.

Касательные напряжения, возникающие на свободных поверхностях $\tau=0$, на поверхностях контакта между заготовкой и стенками штампа, примем в соответствии с законом Зибеля, равными $\tau=2mk$, где m - фактор трения; k - постоянная пластичности деформируемого металла.

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

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

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

Выразим линейные размеры в формуле (4) через известные геометрические параметры, а скорости - через заданную скорость инструмента \dot{U}_1 .

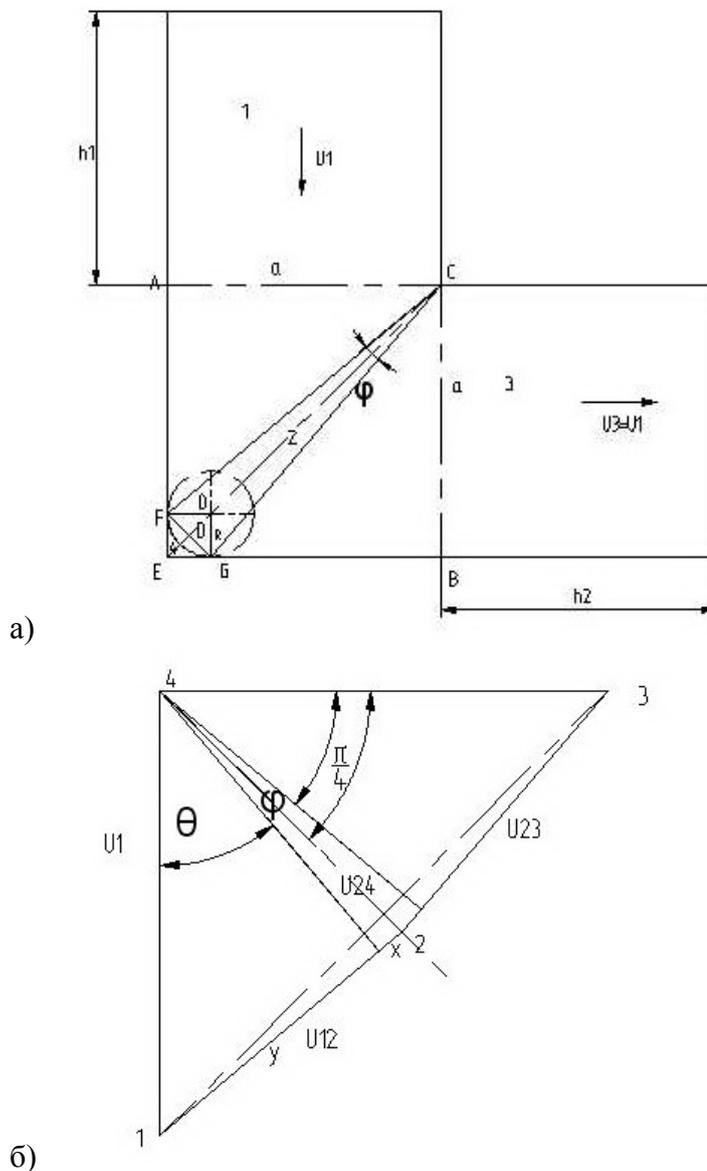


Рис. 2. Схема разбиения очага деформации на жесткие блоки (а) и годограф скоростей перемещений (б).

$$EO = FG = \sqrt{2R^2} = R\sqrt{2};$$

$$ED = R\frac{\sqrt{2}}{2};$$

$$l_{24} = \cup FG = \frac{\pi R \alpha}{180} = \frac{\pi R \frac{\pi}{2}}{\pi} = R\frac{\pi}{2}; \quad (5)$$

$$EC = a\sqrt{2}$$

$$DC = EC - ED = a\sqrt{2} - \frac{R}{2}\sqrt{2} = \sqrt{2}\left(a - \frac{R}{2}\right);$$

$$l_{12} = l_{23} = GC = \sqrt{DC^2 + ED^2} = \sqrt{2\left(a - \frac{R}{2}\right)^2 + \frac{R^2}{2}};$$

$$GC = \sqrt{2a^2 - 4a\frac{R}{2} + \frac{R^2}{4} + \frac{R^2}{2}} = \sqrt{2a^2 - 2aR + \frac{R^2 + 2R^2}{4}} = \sqrt{2a(a - R) + \frac{3}{4}R^2}. \quad (6)$$

Угловые параметры выразим через линейные размеры:

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \frac{DG}{GC} = \frac{R\sqrt{2}}{2\sqrt{2a(a - R) + \frac{3}{4}R^2}}; \quad \cos \frac{\varphi}{2} = \frac{DC}{GC} = \frac{\sqrt{2}\left(a - \frac{R}{2}\right)}{\sqrt{2a(a - R) + \frac{3}{4}R^2}}; \quad (7)$$

$$\frac{\varphi}{2} = \arcsin \frac{R\sqrt{2}}{2\sqrt{2a(a - R) + \frac{3}{4}R^2}} = \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a - R) + 3R^2}} \right) = \arccos \frac{\sqrt{2}\left(a - \frac{R}{2}\right)}{\sqrt{8a(a - R) + 3R^2}}; \quad (8)$$

$$\theta = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} = \frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a - R) + 3R^2}} \right). \quad (9)$$

Определим скорости перемещения в соответствии с годографом скоростей (см. рис.2б):

$$\frac{\dot{U}_{12}^n}{\dot{U}_1} = \cos \theta; \quad (10)$$

$$\dot{U}_{12} = \dot{U}_{23}.$$

Нормальная составляющая вектора скорости перпендикулярна к линии разрыва скоростей:

$$\dot{U}_{12}^n = \dot{U}_1 \cos \theta = \cos \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a - R) + 3R^2}} \right] \dot{U}_1; \quad (11)$$

$$\dot{U}_{12}^n = \dot{U}_{23}^n;$$

$$\frac{\dot{U}_{12}^n}{\dot{U}_{24}} = \cos \frac{\varphi}{2}; \quad \dot{U}_{24} = \frac{\dot{U}_{12}^n}{\cos \frac{\varphi}{2}};$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} &= \frac{R\sqrt{2} \cdot \sqrt{2a(a-R) + \frac{3}{4}R^2}}{2\sqrt{2a(a-R) + \frac{3}{4}R^2} \cdot \sqrt{2(a-\frac{R}{2})}} = \frac{R}{2a-R}; \\ x &= \sqrt{\dot{U}_{24}^2 - (\dot{U}_{12}^n)^2}; \quad y = \sqrt{\dot{U}_1^2 - (\dot{U}_{12}^n)^2}; \quad \dot{U}_{12} = x + y; \\ \dot{U}_{12} &= \sqrt{\left(\frac{\dot{U}_1 \cos \theta}{\cos \frac{\varphi}{2}}\right)^2 - \dot{U}_1^2 \cos^2 \theta + \sqrt{\dot{U}_1^2 - \dot{U}_1^2 \cos^2 \theta}} = \sqrt{\dot{U}_1^2 \left(\frac{\cos^2 \theta}{\cos^2 \frac{\varphi}{2}} - \cos^2 \theta\right) +} \\ &+ \sqrt{\dot{U}_1^2 (1 - \cos^2 \theta)} = \dot{U}_1 \cos \theta \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \frac{\varphi}{2}} - 1} + \sqrt{\dot{U}_1^2 \sin^2 \theta} = \\ \dot{U}_1 \frac{\cos \theta}{\cos \frac{\varphi}{2}} \sqrt{1 - \cos^2 \frac{\varphi}{2}} + \dot{U}_1 \sin \theta &= \dot{U}_1 \left(\cos \theta \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \sin \theta\right); \\ \dot{U}_{24} &= \frac{\cos \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R) + 3R^2}}\right] \dot{U}_1 \times \sqrt{8a(a-R) + 3R^2}}{2\sqrt{2}\left(a - \frac{R}{2}\right)}. \end{aligned} \quad (12)$$

После подстановки найденных значений в формулу (4), получим:

$$p a \dot{U}_1 = k \left\{ \begin{aligned} &2 \frac{\sqrt{8a(a-R) + 3R^2}}{2} \dot{U}_1 \left(\cos \theta \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \sin \theta\right) + R \frac{\pi}{2} \times \\ &\cos \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R) + 3R^2}}\right)\right] \dot{U}_1 \times \sqrt{8a(a-R) + 3R^2} \\ &\times \frac{1}{2\sqrt{2}\left(a - \frac{R}{2}\right)} \end{aligned} \right\} + 4mk(a-R)\dot{U}_1;$$

Разделим на $2\dot{U}_1 k a$:

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

$$+ 2m\left(1 - \frac{a}{R}\right);$$

$$\cos \theta = \cos \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R) + 3R^2}}\right];$$

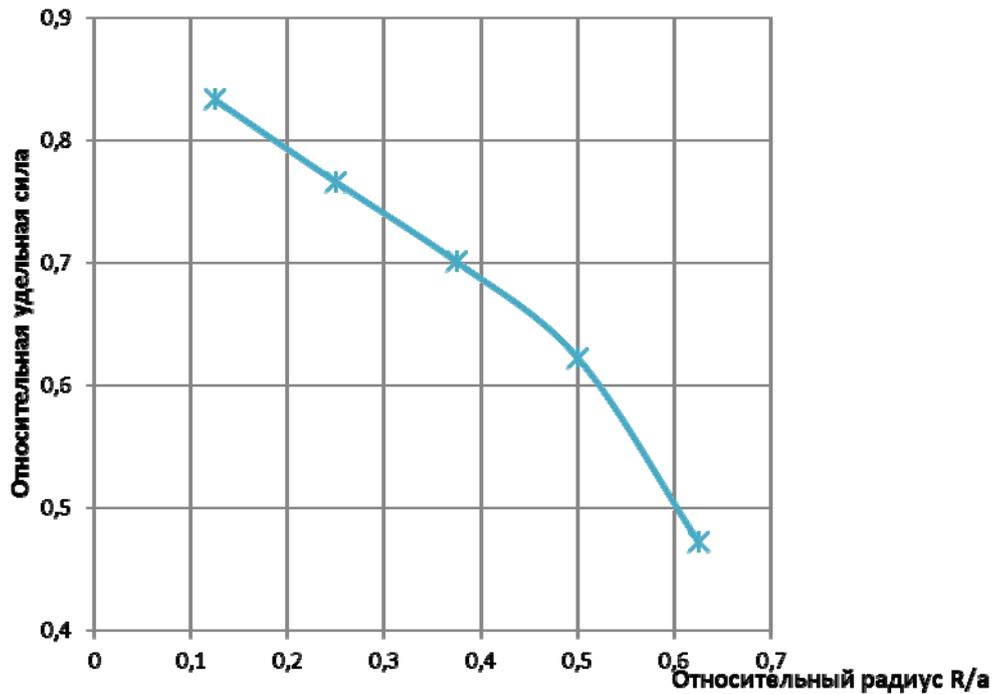
$$\sin \theta = \sin \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R) + 3R^2}}\right];$$

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

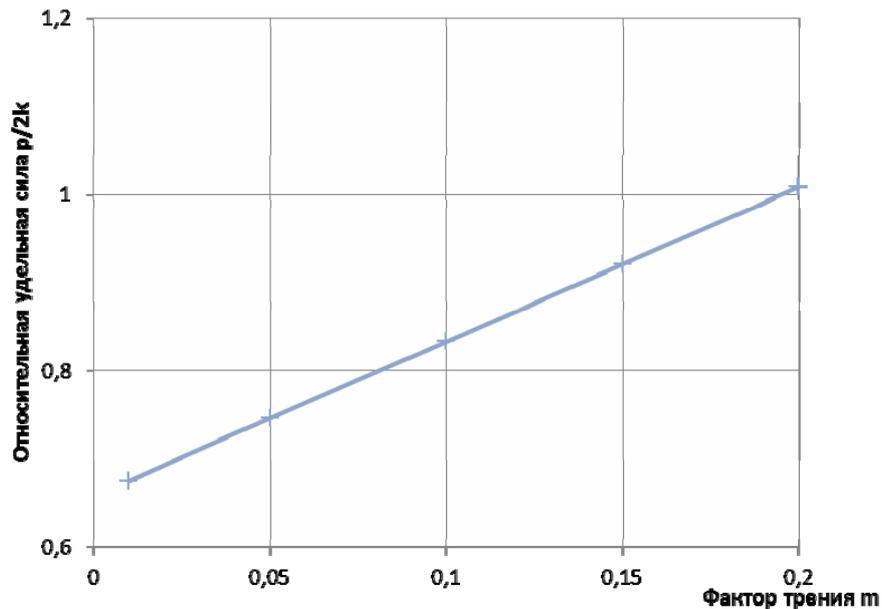
$$\begin{aligned}
 \frac{p}{2k} &= \frac{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}}{2a} \times \left\{ \begin{aligned} &\cos \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}} \right) \right] \times \frac{R}{2a-R} + \\ &+ \sin \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}} \right) \right] + \frac{\pi}{4} \frac{R}{\sqrt{2}(a-\frac{R}{2})} \times \end{aligned} \right\} + 2m \left(1 - \frac{R}{a} \right); \\
 \frac{p}{2k} &= \frac{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}}{2} \times \left\{ \begin{aligned} &\cos \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}} \right) \right] \times \frac{R}{2(a-\frac{R}{2})} \cdot \left[1 + \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \right] + \\ &+ \sin \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R)+3R^2}} \right) \right] \end{aligned} \right\} + 2m \left(1 - \frac{R}{a} \right); \\
 \frac{p}{2k} &= \sqrt{2\left(1-\frac{R}{a}\right) + \frac{3}{4}\left(\frac{R}{a}\right)^2} \times \left\{ \begin{aligned} &\cos \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{R}{a}}{\sqrt{2\left(1-\frac{R}{a}\right) + \frac{3}{4} \frac{R^2}{a^2}}} \right] \times \frac{R}{2\left(1-\frac{R}{a}\right)} \times \left[1 + \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \right] + \\ &\sin \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{R}{a}}{\sqrt{2\left(1-\frac{R}{a}\right) + \frac{3}{4} \frac{R^2}{a^2}}} \right] \end{aligned} \right\} + 2m \left(1 - \frac{R}{a} \right); \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$b = \frac{R}{a};$$

$$\frac{p}{2k} = \sqrt{2(1-b) + \frac{3}{4}b^2} \times \left\{ \begin{aligned} &\cos \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{\frac{\sqrt{2}}{2} b}{\sqrt{2(1-b) + \frac{3}{4} b^2}} \right) \right] \times \frac{b}{2(1-\frac{b}{2})} \times \left[1 + \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \right] + \\ &+ \sin \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{\frac{\sqrt{2}}{2} b}{\sqrt{2(1-b) + \frac{3}{4} b^2}} \right) \right] \end{aligned} \right\} + 2m(1-b). \quad (14)$$



а)



б)

Рис.3. Зависимость удельной силы $p/2k$ от относительного радиуса закругления канала (а) и фактора трения (б).

Анализ напряженного состояния по разработанной математической модели приводит к следующим оценкам. Характер изменения относительного давления $p/2k$, действующего на торец пуансона, в зависимости от относительного радиуса закругления канала R/a представлен на рис. 3а, из которого видно, что при увеличении относительного радиуса закругления канала величина давления падает. Влияние фактора трения на значения безразмерного давления показано на рис. 3б. 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:

$$\gamma = \gamma_{12} + \gamma_{23}. \quad (15)$$

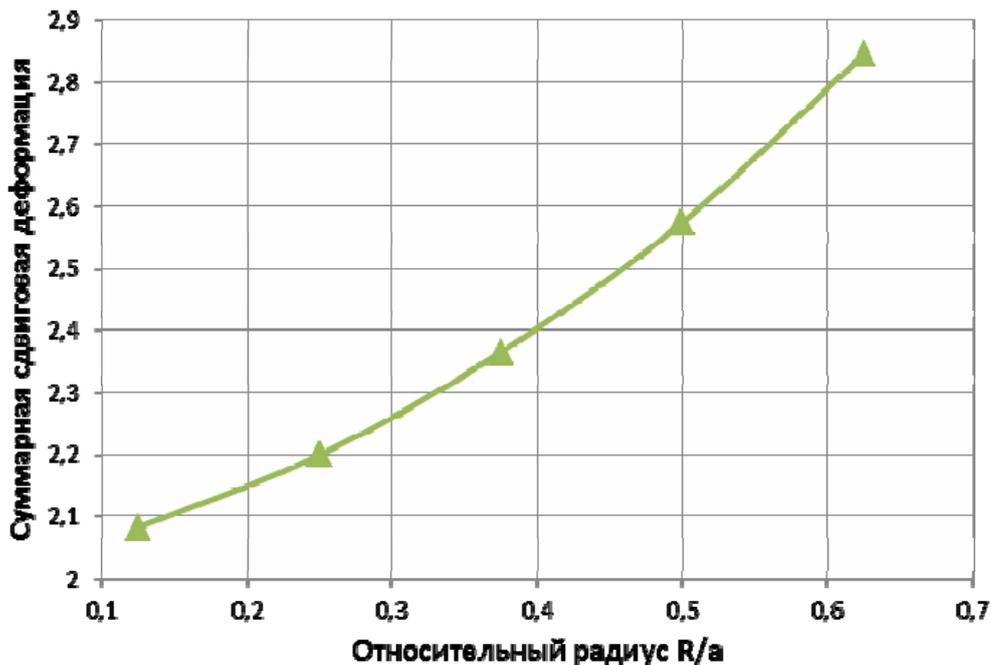
Согласно положениям работы [8]:

$$\gamma_{ij} = \frac{\dot{U}_{ij}}{\dot{U}_{ij}^n}. \quad (16)$$

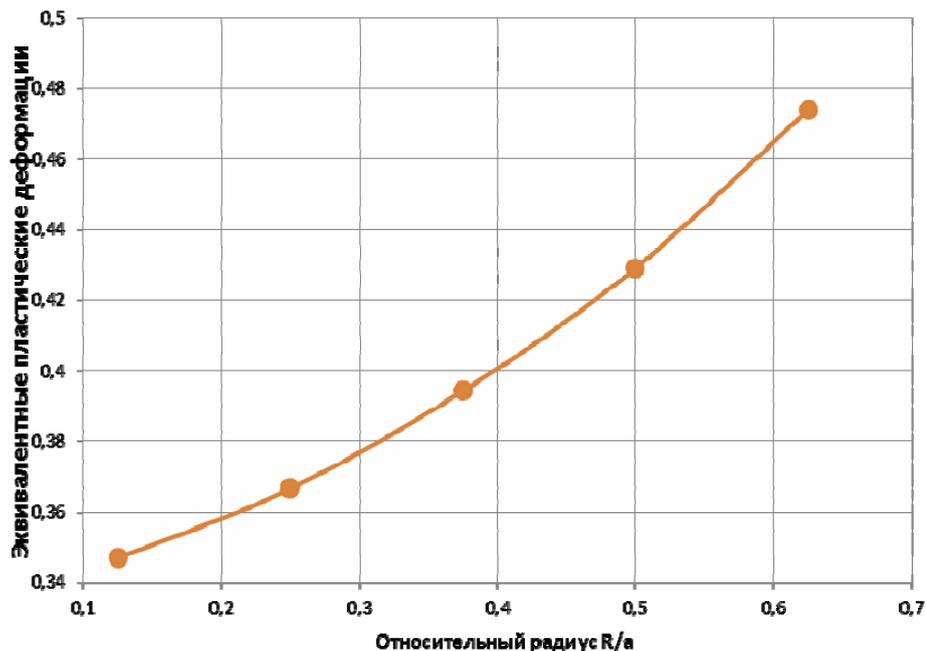
$$\begin{aligned} \gamma_{12} = \gamma_{23} &= \frac{\cos \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R) + 3R^2}} \right) \right] \frac{R}{2a-R} + \sin \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R) + 3R^2}} \right) \right]}{\cos \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R) + 3R^2}} \right) \right]} = \\ &= \frac{R}{2a-R} + \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R) + 3R^2}} \right) \right]; \\ \gamma &= 2 \left\{ \frac{R}{2a-R} + \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R) + 3R^2}} \right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Эквивалентные пластические деформации при РКУП

$$\varepsilon_e = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left\{ \frac{R}{2a-R} + \operatorname{tg} \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{R\sqrt{2}}{\sqrt{8a(a-R) + 3R^2}} \right) \right] \right\}. \quad (18)$$



a)



б)

Рис. 4. Зависимость деформированного состояния от относительного радиуса закругления R/a : а – суммарные сдвиговые деформации γ ; б – эквивалентные пластические деформации ε_e .

Суммарные деформации сдвига γ и эквивалентные пластические деформации ε_e зависят от геометрических параметров канала матрицы. Из графиков, показанных на рис. 4а, б, следует, что увеличение относительного радиуса закругления канала R/a сопровождается интенсивным ростом значений указанных деформаций.

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 относительного радиуса R/a увеличиваются значения суммарной сдвиговой деформации и интенсивности пластических 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. *Нургалева В.В., Семенова И.П., Рааб Г.И., Валеев Р.З.* Влияние равноканального углового прессования на формирование ультрамелкозернистой структуры и механические 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. *Боткин А.В., Валиев Р.З., Мурашкин М.Ю.* и др. Интенсивная пластическая деформация выдавливанием, совмещенным с равноканальным угловым прессованием в

параллельных каналах. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2010. - №10. - С. 36-42.

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. *Буханько А.А., Лошманов А.Ю., Хромов А.И.* Расчет полей деформаций в задачах обработки материалов давлением при наличии особенностей поля скоростей перемещений.// Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2006. - №9. - С. 22-27.

7. *Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М.* Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. – СПб.: Наука, 2004. – 644 с.

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

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