

УДК 621.77.01

Добров И. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОСАДКЕ ПЛОСКИМИ БОЙКАМИ

Свободная осадка заготовки плоскими бойками является единственным методом пластической деформации, который используется как при выполнении технологических операций, так и для определения механических свойств различных материалов в процессе испытаний образцов на сжатие. Для определения энергосиловых параметров свободной осадки точность результатов расчета в пределах 10 % является удовлетворительной, что позволяет принимать различные допущения при анализе кинематики процесса осадки [1–4] для получения расчетных формул, которые, как правило, дают удовлетворительные результаты в определенном диапазоне размеров исходной заготовки, величин обжатия, механических свойств заготовки, ее температуры и т. д. Однако при проведении испытаний на сжатие требуется более корректное определение энергосиловых параметров деформации, т. к. от этого зависит универсальность самого метода испытаний механических свойств различных материалов и там, где это возможно, следует исключать из анализа процессов деформации различные допущения, в том числе и при определении кинематики процесса осадки.

Цель работы – исследование общих закономерностей кинематики очага деформации при осадке заготовки с различными механическими свойствами для разработки метода физического моделирования производственных процессов.

В настоящее время принято считать [1–4], что если в процессе осадки (рис. 1) на контактной поверхности заготовки и инструмента отсутствуют силы трения, то заготовка $ABCD$ единичной ширины $B_0 = 1$ высотой h_0 и длиной l_0 до осадки и заготовка $KEHG$ высотой h_1 , шириной $B_1 = B_0 = 1$ и длиной l_1 после осадки (плоская деформация) имеют вертикальные боковые поверхности, представленные в системе координат xOy линиями AD , BC и KG , EH .

Такой характер осадки предопределяет перемещение (s_x) сечений заготовки, перпендикулярных оси Ox , со скоростью v_x в направлении этой оси за время осадки заготовки:

$$\Delta t = \frac{\Delta h}{v_u}, \quad (1)$$

где $\Delta h = h_0 - h_1$ – перемещение подвижного инструмента в процессе осадки;

v_u – скорость перемещения инструмента в соответствии с уравнениями:

$$\begin{cases} s_x = s_x(x, t) = \frac{1}{h_{\Pi}} \int_0^{h_{\Pi}} s_x(x, t) dy; \\ v_x = v_x(x, t) = \frac{ds_x(x, t)}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где $s_x(x, t)$ и $v_x(x, t)$ – соответственно текущие значения величин s_x и v_x при $0 < t \leq \Delta t$; $h_{\Pi} = h_0 - v_u t = h_0 - \Delta h_n$ – текущее значение высоты заготовки в процессе деформации.

При этом все сечения заготовки параллельные оси Ox до осадки в процессе осадки остаются параллельными этой оси и скорость их перемещения (s_y) вдоль этой оси со скоростью (v_y) определяется условиями [1–4]:

$$s_y(y = h_1) = \Delta h \text{ и } s_y(y = 0) = 0; \quad v_y(y = h_1) = v_u \text{ и } v_y(y = 0) = 0. \quad (3)$$

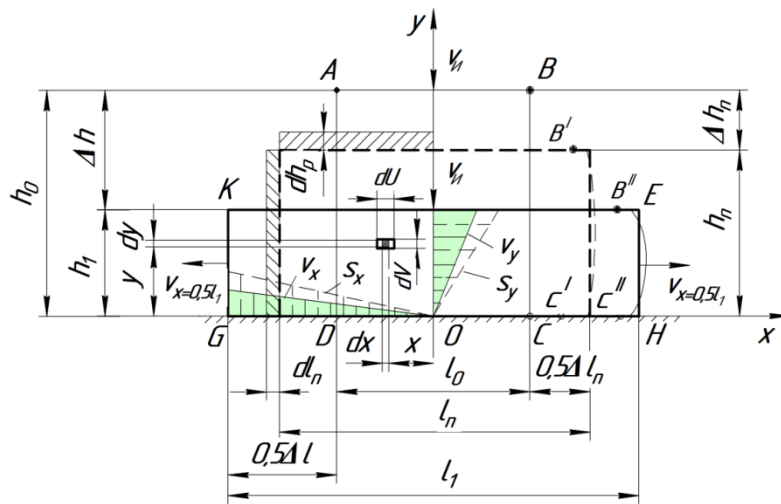


Рис. 1. Кинематическая схема процесса осадки (тонкими сплошными линиями обозначена исходная заготовка, штрихпунктирными – текущее (промежуточное) положение заготовки при осадке, сплошными линиями нормальной толщины – заготовка в момент окончания осадки)

Для текущего положения заготовки (рис. 1) из условия равенства смещенных объемов следует [3]:

$$d\Delta h_n \cdot l_n = dl_n \cdot h_n \text{ и } -dy \cdot x = dx \cdot y, \tag{4}$$

где $dh_n = d(h_0 - y) = -dy$; $l_n = x$ – текущая длина деформируемой заготовки при $l_0 < x = l_n < l_1$ и $dl_n = dx$.

Откуда получим [1, 3]:

$$\frac{dl_n}{l_n} = -\frac{dh_n}{h_n} = -\frac{dy}{y} = \frac{dx}{x} \text{ (} l_0 \leq x \leq l_1 \text{ и } h_1 \leq y \leq h_0 \text{)}. \tag{5}$$

Из (5) следует:

$$h_0 \cdot l_0 = h_1 \cdot l_1 = h_n \cdot l_n, \tag{6}$$

а из (4), (6) и (1) получим уравнение:

$$dx \cdot \frac{h_1}{\Delta t} = -dy \cdot \frac{l_1}{\Delta t} \text{ и } dx \cdot v_{y,cp}(t) = -dy \cdot v_{x,cp}(t). \tag{7}$$

Принимая $v_{y,cp}(t) = -\frac{v_u}{2}$ [1–4], из (1)–(3), (6), (7) следует:

$$v_{x,cp}(t) = -v_{y,cp}(t) \frac{l_1}{h_1} = \frac{v_u}{2} \mu \frac{l_0}{h_0} = v_{x,cp}; \tag{8}$$

$$s_x(x = 0,5l_1, t) = \frac{v_{x,cp}(t)}{2} \cdot \Delta t = \frac{l_0}{4} (\mu - 1) = s_x(x = 0,5l_1); \tag{9}$$

$$s_x(x, t) = \frac{2 \cdot s_x(x = 0,5l_1, t) \cdot x}{l_1} = \frac{\mu - 1}{2\mu} x = s_x(x); \tag{10}$$

$$v_x(x, t) = \frac{s_x(x, t)}{\Delta t} = \frac{v_u}{2h_0} x = v_x(x); \tag{11}$$

$$s_y(y,t) = -\frac{s_y(y=h_0) \cdot y}{h_0} = -(\mu-1) \cdot y = s_y(y); \quad (12)$$

$$v_y(y,t) = -\frac{s_y(y,t)}{\Delta t} = -\frac{v_u}{h_0} y = v_y(y), \quad (13)$$

где $\mu = \frac{h_0}{h_1} > 1$ – коэффициент обжатия по высоте.

Анализ уравнений (8)–(13) показывает, что кинематические параметры очага деформации при осадке в явном виде не зависят от времени пластической деформации, а зависят от координат точек, определяющих пространство очага деформации при изменении его размеров без изменения площади пространства в процессе плоской деформации.

Проанализируем полученные кинематические параметры идеализированного процесса осадки¹ с общих позиций возможности их реализации при пластической деформации заготовки в плоскости xOy (плоская деформация) [1–5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (14)$$

где $U = U(x, y)$ и $V = V(x, y)$ – соответственно функции перемещения вдоль осей координат Ox и Oy .

Учитывая, что $U = \int_0^x dU = \int_0^x \frac{\partial U}{\partial x} dx$ и $V = \int_0^y dV = \int_0^y \frac{\partial V}{\partial y} dy$, то величины dU и dV будут

определять элементарную площадку деформируемой заготовки $dS = dU \cdot dV$ в окрестностях точки пространства с координатами x и y (рис. 1). Необходимо отметить, что в случае, когда $dx \rightarrow 0$, $dy \rightarrow 0$, величина $dS = dx \cdot dy \rightarrow 0$ определяет геометрическую точку заготовки, положение которой в пространстве очага деформации определяется точкой пространства с координатами x и y , в то время как элементарная площадка заготовки в окрестностях геометрической точки заготовки является величиной бесконечно малой, но конечной [6].

$$dS(U, V) = dS + dS(U^{|}, V^{|}),$$

где $dS(U^{|}, V^{|}) \rightarrow \xi$ и $0 < \xi < \zeta$, а ζ – любая бесконечно малая наперед заданная величина. Откуда следует:

$$U = U(x, y) = s_x(x, y) + U^{|}(x, y); \quad (15)$$

$$V = V(x, y) = s_x(x, y) + V^{|}(x, y), \quad (16)$$

где $U^{|}(x, y)$ и $V^{|}(x, y)$ – соответственно функции, определяющие пластическую деформацию материала заготовки в направлении осей Ox и Oy внутри пространства очага деформации в окрестностях точки заготовки с координатами x, y .

Из (14) – (16) получим:

¹ Осадка, при которой отсутствуют силы внешнего трения и изменение формы боковых поверхностей заготовки, свободных от внешних нагрузок.

$$\begin{cases} \frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial s_y}{\partial y} + \frac{\partial U^I}{\partial x} + \frac{\partial V^I}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial s_x}{\partial y} + \frac{\partial s_y}{\partial x} + \frac{\partial U^I}{\partial y} + \frac{\partial V^I}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (17)$$

Из (15), (16) определим скорости перемещения материала заготовки вдоль координатных осей в процессе пластической деформации:

$$v_U = \frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dU}{dx} \cdot v_x = \left(\frac{ds_x}{dx} + \frac{dU^I}{dx} \right) \cdot v_x; \quad (18)$$

$$v_V = \frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dy} \frac{dy}{dt} = \left(\frac{ds_y}{dy} + \frac{dV^I}{dy} \right) \cdot v_y, \quad (19)$$

где $\frac{ds_x}{dx} v_x$ и $\frac{ds_y}{dy} v_y$ – представляют соответствующие проекции скоростей v_x и v_y геометрической точки заготовки в пространстве очага деформации;

$\frac{dU^I}{dx} v_x$ и $\frac{dV^I}{dy} v_y$ – представляют соответствующие проекции скоростей деформаций материала заготовки в точках очага деформации с координатами x , y , которые в текущий момент времени соответствуют координатам, определяющим значения v_x и v_y .

Из (18), (19) следует, что между проекциями скорости перемещения материала заготовки v_U , v_V и проекциями скорости движения точки заготовки v_x , v_y , характеризующими ее перемещение в очаге деформации², имеет место пропорциональная зависимость для очагов деформации с геометрически подобными размерами.

Если $\frac{ds_x}{dx} = k \frac{dU^I}{dx}$ и $\frac{ds_y}{dy} = k \frac{dV^I}{dy}$, где k – коэффициент пропорциональности, то между

v_U , v_V , и v_x , v_y будет прямо пропорциональная зависимость. Такая деформация представляет однородную деформацию (рис. 1 слева) и условия ее реализации может определить система уравнений (14) или:

$$\begin{cases} \frac{\partial s_x}{\partial x} + \frac{\partial s_y}{\partial y} = 0; \\ \frac{\partial s_x}{\partial y} + \frac{\partial s_y}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Для идеализированного процесса осадки (10), (12) условие второго уравнения системы (20) удовлетворяется без ограничений, т. к.:

$$\frac{ds_x}{dy} = \frac{ds_y}{dx} = 0, \quad (21)$$

а условия первого уравнения системы уравнений (18) не выполняются ни при каких условиях, т. к.:

² Фактический очаг деформации определяется размерами пространства, ограниченного поверхностями инструмента и поверхностями заготовки в направлении движения слоев материала, внутри которого осуществляется пластическая деформация заготовки.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{ds_x}{dx} = \frac{\mu - 1}{2\mu},$$

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \frac{ds_y}{dy} = -(\mu - 1).$$

Соответственно получим:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{(2\mu - 1) \cdot (\mu - 1)}{2\mu} \neq 0, \quad (22)$$

т. е. идеализированный процесс осадки, который представляет однородную пластическую деформацию, не имеет достаточного теоретического обоснования. Следовательно, осадка «без трения» на контактной поверхности³ всегда будет сопровождаться формоизменением боковой поверхности за счет выхода на контактные и боковые поверхности деформируемой заготовки точек материала изнутри объема заготовки и перемещения точек материала B и C (рис. 1 справа) с боковой поверхности исходной заготовки по поверхности деформируемой заготовки (точки B^I , B^{II} и C^I , C^{II}).

Докажем теоретически возможность и необходимость процесса бочкообразования заготовки при идеальной осадке на основании анализа процесса бочкообразования при осадке заготовки с трением на контактной поверхности [4], представленного в этой работе рис. 1, а в материалах статьи на рис. 2, а.

Бочкообразование на рис. 2, а автором [4] обосновывается тем, что влияние сил трения (напряжений сил трения τ_k) на область затрудненных деформаций 1, прилегающих к поверхностям инструмента [3, 4], более интенсивно, чем влияние этих сил на срединные слои материала заготовки в области 2, которые вследствие этого расширяются быстрее при контактных, образуя бочкообразность (рис. 2, а справа). Соответственно при отсутствии этих напряжений боковая поверхность заготовки в процессе деформации не будет изменять свою форму. Такой вывод является следствием того, что на рис. 2, а не указаны внутренние силы (напряжения), которые обеспечивают движение материала заготовки вдоль контактной поверхности, уравновешивая силы трения.

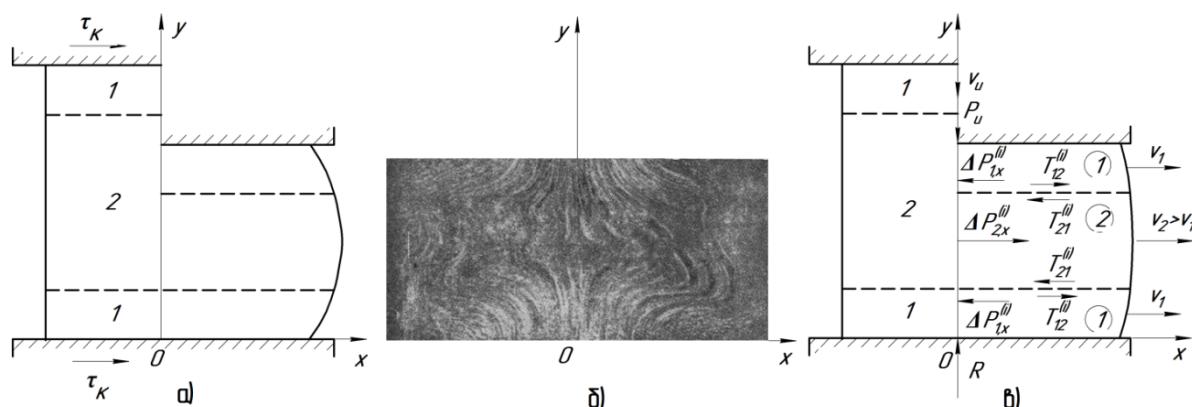


Рис. 2. Схема процесса бочкообразования боковой поверхности заготовки:

а – образование выпуклости боковой поверхности заготовки в процессе осадки с трением (согласно рис. 1 работы [4]); б – изменение микроструктуры образца на оси симметрии осаживаемой заготовки (микрошлиф из работы [5]); в – расчетная схема к обоснованию бочкообразности при осадке без трения

³ Осадку симметричной заготовки плоскими бойками без трения на контактной поверхностью можно классифицировать как процесс идеальной осадки.

Особенность действия внутренних сил при осадке состоит в том, что они обеспечивают движение материала заготовки в направлении перпендикулярном направлению действия внешних сил, за счет повышения давления внутри заготовки в точках, расположенных на оси симметрии очага деформации [7, 8]. Об этом свидетельствует изменение микроструктуры образца [5], представленного на рис. 2, б. Характер взаимодействия внутренних сил при идеальном процессе осадки представлен на рис. 2, в справа. В направлении оси Oy на заготовку действуют внешние уравновешивающие друг друга силы – сила давления инструмента (P_u) и сила реакции неподвижного основания ($R = -P_u$). Эти силы обеспечивают действие в очаге деформации внутренних сил в направлении оси Oy , равнодействующая которых равна внешней силе P_u и на рис. 2 условно не показана. В направлении оси Ox на перемещающийся материал заготовки действуют только внутренние силы, равнодействующая которых должна быть равна нулю [1–3] в каждой из симметричных половин осаживаемой заготовки. Если не учитывать силу инерции материала заготовки, действующую в направлении оси Ox , получим:

$$\sum X = \Delta P_{2,x}^{(i)} + 2\Delta P_{1,x}^{(i)} + 2P_{\tau,12}^{(i)} - 2P_{\tau,21}^{(i)} = 0, \quad (23)$$

где $\Delta P_{2,x}^{(i)}$ и $\Delta P_{1,x}^{(i)}$ – соответственно результирующие силы нормальных напряжений сжатия $\sigma_{x,2}$ и $\sigma_{x,1}$, действующих в областях 2 и 1 заготовки при условии $|\sigma_{x,2}| > |\sigma_{x,1}|$; $P_{\tau,21}^{(i)}$ и $P_{\tau,12}^{(i)}$ – соответственно результирующие силы касательных напряжений τ_{21} и τ_{12} ($\tau_{21} = -\tau_{12}$), действующих на границах областей 2 и 1 при условии, что скорости движения этих областей будут различны $v_2 > v_1$.

Разные значения скоростей перемещения слоев материала в областях заготовки 1 и 2 приводят к изменению геометрии боковой поверхности заготовки и при отсутствии сил трения на контактной поверхности (см. на рис. 1 справа – тонкие штрихпунктирные и основные линии). При одинаковом обжатии заготовки с равными геометрическими размерами исходной заготовки в зависимости от физико-механических свойств материала заготовки размеры очага деформации будут изменяться при неизменном объеме пространства, которое ограничено объемом пластически деформируемого материала заготовки. В этом случае изменение размеров заготовки возможно только за счет изменения формы поверхности заготовки, которая не контактирует с поверхностью инструмента, и происходит за счет изменения размеров контактной поверхности заготовки и инструмента.

Для подтверждения этого положения был проведен следующий эксперимент (рис. 3) [8]. Цилиндрические заготовки 1 из различных материалов с одинаковыми размерами осаживали плоским пуансоном 2, на торцевой поверхности которого был выполнен паз с поднутрением ($b_n < B_n$) в виде «ласточкиного хвоста» глубиной H_n , который обеспечил получение на торцевой поверхности заготовки выступа высотой $h_n < H_n$ (рис. 3, а). При такой схеме осадки на верхней и боковых поверхностях выступа в процессе его формообразования не действовали силы трения. Форма поверхностей продольного выступа определяла характер распределения кинематических параметров формообразования выступа «без трения» при различных значениях коэффициента обжатия (μ) заготовки по высоте:

- на рис. 3, б, в; рис. 3, г, д; рис. 3, е, ж величина μ различна при осадке заготовок из одного и того же материала;
- на рис. 3, б, е – величина μ примерно одинакова для заготовок из пластилина и алюминиевого сплава;

– на рис. 3, в, д, ж – величина μ , при которой заготовки из различных материалов разрушались, последовательно уменьшалась для заготовок из пластилина, свинца и алюминиевого сплава.

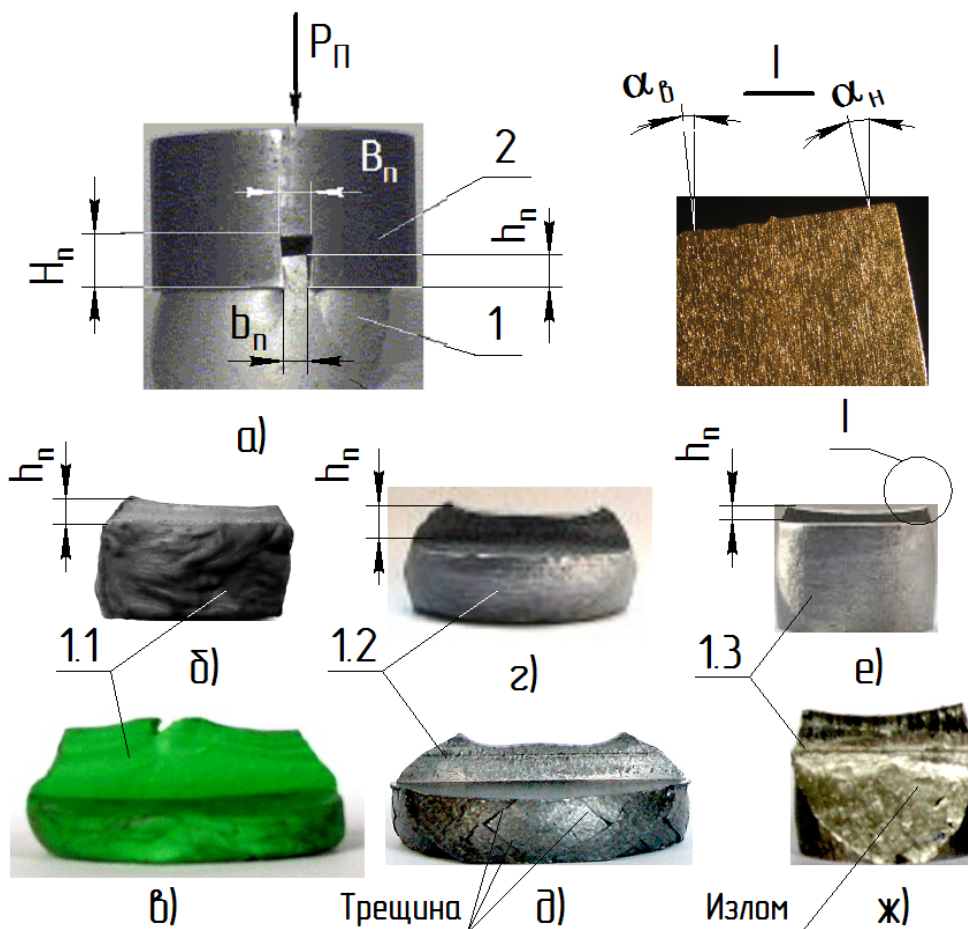


Рис. 3. Осадка «без трения» на поверхностях выступа заготовки 1:

а – схема процесса осадки пуансоном 2 с продольным пазом в виде «ласточкиного хвоста»; б и в – осажённые заготовки из пластилина 1.1; г и д – из свинца – 1.2; е и ж – из алюминия – 1.3

Анализ результатов эксперимента и теоретических исследований, представленных уравнениями (15)–(18), показывает:

1. Характер формы выступа на торцевой поверхности заготовки до начала его разрушения не зависит от материала заготовки. Для заготовок из пластилина, свинца и алюминиевого сплава боковые поверхности выступов всегда представляют выпуклые поверхности, а верхние поверхности выступов всегда вогнутые (угол наклона слоев материала (α) по мере их приближения к оси симметрии заготовки на шлифе продольного выступа заготовки (выноска I) уменьшается $\alpha_b < \alpha_n$).

2. Чем пластичнее материал, тем больше коэффициент осадки до начала разрушения материала: на пластилине это разрушение выступа; на алюминиевом сплаве это разрушение основного материала. Соответственно, чем пластичнее материал, тем больше геометрические размеры у выступа на осажённой заготовке и тем более четко можно проследить изменение кинематических параметров формообразования при пластической деформации.

3. При плоской деформации поле скоростей очага деформации определяется координатами точек пространства очага деформации, ограниченного площадью сечения деформируемой заготовки, в которых скорости перемещения точек материала заготовки представляют неразрывную функцию.

4. Поле перемещений материала деформируемой заготовки представляет перемещение материала заготовки в окрестностях каждой точки поля скоростей очага деформации.

5. При равном обжатии заготовок с одинаковыми исходными размерами поля скоростей при неразрывной деформации материалов с различными физико-механическими свойствами отличаются только пропорциональными значениями скоростей при одних и тех же координатах.

6. Каждому полю скоростей очага деформации соответствует определенное поле перемещений, которое характеризует величину деформации материала заготовки в каждой точке пространства очага деформации и тем самым определяет возможность пластической деформации заготовки с различными физико-механическими свойствами в этом очаге деформации.

ВЫВОДЫ

Кинематика процесса пластической деформации предопределяет изменение формы сечений заготовки, перпендикулярных направлению движения материала вдоль контактных поверхностей очага деформации. Внешнее трение на контактной поверхности может только интенсифицировать этот процесс формоизменения, который наглядно проявляет себя при бочкообразовании поверхности осаживаемой заготовки.

Кинематические параметры очага деформации, определяющие профиль готового изделия в производственных условиях, можно и целесообразно исследовать на примере деформации заготовки из материала с высокими пластическими свойствами в лабораторных условиях с использованием модели очага деформации геометрически подобного очагу деформации в производственных условиях, но при этом необходимо учитывать следующие особенности:

– если деформация заготовки в условиях эксперимента обеспечила положительный результат, то этот результат нуждается в дополнительной проверке в производственных условиях;

– при отрицательном результате экспериментальных исследований отрицательный результат будет однозначно получен и в производственных условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грудев А. П. Трение и смазка при обработке металлов давлением. Справ. Изд. / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.
2. Теория обработки металлов давлением / И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго, В. Л. Колмогоров, В. Н. Трубин, Р. А. Вайсбург, В. И. Тарновский. – М. : Металлургия, 1963. – 672 с.
3. Сторожев М. П. Теория обработки металлов давлением / М. П. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1982. – 312 с.
4. Воронцов А. Л. Теория бочкообразования заготовки при осадке / А. Л. Воронцов // Производство проката. – 2007. – № 5. – С. 2–11.
5. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. Т. 2 / С. И. Губкин. – М. : Metallurgizdat, 1961. – 416 с.
6. Добров И. В. Анализ процессов трения твердых и пластически деформируемых тел в механике машин на примере осадки симметричной заготовки плоскими бойками (Сообщение 1) / И. В. Добров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2009. – № 2. – С. 3–8.
7. Добров И. В. Анализ процессов трения твердых и пластически деформируемых тел в механике машин на примере осадки симметричной заготовки плоскими бойками (Сообщение 2) / И. В. Добров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2009. – № 3. – С. 3–10.
8. Добров И. В. Разработка механических моделей деформации симметричной заготовки при осадке плоскими бойками (Сообщение 1) / И. В. Добров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 2. – С. 34–42.

Добров И. В. – канд. техн. наук, доц., зав. каф. НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: igordobrov@yahoo.com