

КОМБИНИРОВАННОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА**Алиева Л. И., Чучин О. В., Мироненко Е. В.**

Энергетическим методом верхней оценки проведено исследование силового режима процесса комбинированного последовательного радиально-прямого выдавливания полых деталей из сплошной заготовки и получены энергетическим методом формулы для расчёта давления деформирования процесса радиально-прямого выдавливания упрочняющегося материала на стационарной стадии в зависимости от безразмерных геометрических параметров и условий трения. Представлены уравнения траекторий перемещения на стационарной стадии процесса радиально-прямого выдавливания материальных частиц вдоль линии тока, зависящие от хода пуансона. Получены зависимости для расчёта уравнений траекторий перемещения материальных частиц в процессе комбинированного последовательного радиально-прямого выдавливания, которые позволяют определить накопленную данными частицами деформацию в любой точке вдоль линии тока. Установлен характер распределения накопленной деформации и истинного напряжения по поперечному сечению стенки выдавленного стакана. Наибольшие значения данных параметров получены для слоёв материала заготовки вблизи внутреннего радиуса выдавливаемого стакана, а наименьшие – для слоёв вблизи внешнего радиуса.

Енергетичним методом верхньої оцінки проведено дослідження силового режиму процесу комбінованого послідовного радіально-прямого видавлювання порожнистих деталей із суцільної заготовки і отримані енергетичним методом формули для розрахунку тиску деформування процесу радіально-прямого видавлювання матеріалу, що зміцнюється, на стаціонарній стадії в залежності від безрозмірних геометричних параметрів та умов тертя. Представлені рівняння траекторій переміщення на стаціонарній стадії процесу радіально-прямого видавлювання матеріальних частинок уздовж лінії струму, що залежать від ходу пуансона. Отримано залежності для розрахунку рівняння траекторій переміщення матеріальних частинок в процесі комбінованого послідовного радіально-прямого видавлювання, які дозволяють визначити накопичену даними частками деформацію в будь-якій точці уздовж лінії струму. Встановлено характер розподілу накопиченої деформації та істинної напруги по поперечному перерізу стінки видавленого стакану. Найбільші значення даних параметрів отримані для шарів матеріалу заготовки поблизу внутрішнього радіусу стакану, що видавлюється, а найменші – для шарів поблизу зовнішнього радіуса.

The upper bound method to determine power mode in combined radial-forward extrusion process for hollow part from solid billet is investigated and determine upper bound formula for deformation pressure calculation of radial-forward extrusion with hardening material in the stationary step with depending on the dimensionless geometric parameters and the friction conditions. The equation of motion trajectory in the stationary step for radial-forward extrusion process with material particles along the current lines depending on the punch stroke is defined. Depending equations to calculate the trajectory in particles of material movement for combined radial-forward extrusion process that data allow to determine the accumulated particulate deformation at any point along the streamlines is determined. The accumulated strain distribution character and intensity stress with the cross section of the extruded cup wall are defined. The highest values of these parameters obtained for the billet material layer near the inner radius of the extruded glass, and the lowest - for the layers near the outer radius.

Алиева Л. И.

канд. техн. наук, доц. каф. ОМД ДГМА
omd@dgma.donetsk.ua

Чучин О. В.

канд. техн. наук, доц. каф. ОМД ДГМА

Мироненко Е. В.

д-р. техн. наук, проф., зав. каф. Мн ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.777.01

Алиева Л. И., Чучин О. В., Мироненко Е. В.

КОМБИНИРОВАННОЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ УПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА

Процессы выдавливания являются эффективным методом получения точных заготовок и деталей высокого качества [1, 2].

Способ последовательного радиально-прямого выдавливания относится к процессам с развитым радиальным течением материала заготовки. Этот способ позволяет изготовить полые изделия типа стакана простой формы или со сложным внешним и внутренним контуром из сплошной, как правило, заготовки за один переход [3–7].

Теоретический анализ процесса радиально-прямого выдавливания энергетическим методом позволил ранее [8, 9] получить формулы для расчёта траекторий движения материальных частиц в деформируемом объёме, накопленных ими деформаций на выходе из очага деформации и давления деформирования с учётом упрочнения. При этом данные формулы не позволяют рассчитать накопленную деформацию в любой точке линии тока в зависимости от хода пуансона.

Математическая модель, построенная на основе упрощенной расчётной схемы параллельного течения с использованием простых кинематических координатных модулей, позволила установить влияние выбранного кинематически возможного поля скоростей (КВПС) на характер траекторий перемещения материальных частиц вдоль линии тока, величину накопленных деформаций и напряжения текучести в любой точке линии тока, распределение накопленных деформаций и напряжения текучести по сечению стенки выдавленного полого изделия, а также величину давления деформирования с учётом упрочнения [10, 11].

Представляет интерес рассмотреть и другие расчетные схемы процесса радиально-прямого выдавливания полого изделия из упрочняющегося материала, состоящие из модулей, как с координатными, так и с параболическими границами [9].

Целью данной работы является анализ и сопоставление расчетных схем процесса комбинированного выдавливания, составленных из кинематических модулей усложненной конструкции, точнее описывающих реальную пластическую зону.

Для теоретического анализа процесса радиально-прямого выдавливания полого изделия из упрочняющегося материала были выбраны три расчётные схемы, в состав которых входят, соответственно, следующие модули (блоки): «А1»-«В2»-«Д1»-«К2»-«Л1», «А1»-«В1»-«Д1»-«К2»-«Л1» и «А1»-«В1»-«Д1»-«К1»-«Л1» [1]. В цифровом выражении состав расчётных схем будет иметь один и тот же вид: 1-3-5-7-8. КВПС координатных модулей «В1», «В2», «Д1», «К1», «К2», «Л1» ранее были приведены в работе [9].

В формулах, таблицах и на графиках геометрические размеры высот H , радиусов R , толщины стенки стакана S отнесены к радиусу заготовки R_1 , и обозначены, соответственно,

$$\bar{H}, \bar{R}, \bar{S} \text{ с соответствующими индексами. Тогда безразмерный радиус заготовки } \bar{R}_1 = \frac{R_1}{R_1} = 1.$$

Выражения скоростей и компонент скорости V отнесены к скорости активного пуансона V_a и представлены в виде v . Поэтому $v_a = \frac{-V_a}{V_a} = -1$. Безразмерный параметр приведен-

ного давления обозначен $\bar{p} = \frac{p}{\sigma_s}$, где p – давление деформирования и σ_s – напряжение текучести материала.

Анализ полученных в результате упрощений КВПС рассматриваемых блоков позволил сделать вывод об отсутствии поверхностей среза между блоком «Д1» и кинематическим

элементом «7в» блока «К2», блоком «Л1» и кинематическим модулем «7б» блока «К2», блоком «А1» и кинематическим модулем «3а» блока «В2», блоком «Д1» и кинематическим модулем «3в» блока «В2». Вследствие чего данные кинематические единицы были объединены в блоки 1^0 , 3^0 , 5^0 , 8^0 . В состав объединённого блока 1^0 входит блок «А1» и кинематический модуль «3а» блока «В2», 3^0 – блок «Д1», кинематический модуль «3в» блока «В2» и кинематический модуль «7в» блока «К2», 5^0 – блок «Д1» и кинематический модуль «7в» блока «К2», 8^0 – блок «Л1» и кинематический модуль «7б» блока «К2». Следовательно, в состав расчётной схемы 1 (рис. 1, а) входят блоки 1^0 - 3^0 - 8^0 , расчётной схемы 2 (рис. 1, б) – 1 - 3 - 5^0 - 8^0 , расчётной схемы 3 (рис. 1, в) – 1 - 3 - 5 - 7 - 8 . Принимается относительный радиус $\bar{R}_0 = 0$, т. е. заготовка – сплошная, а в расчётных схемах на рис. 1 отсутствует оправка.

Рассматривается установившаяся стадия процесса радиально-прямого выдавливания. О его стационарности можно судить по тому, что уже сформировался неизменный в объёме заготовки очаг пластической деформации (модули 3 , 5 , 7 , 5^0 , 3^0) и по наличию жёстких блоков на входе в очаг пластической деформации (модули 1 , 1^0) и на выходе из него (модули 8 , 8^0).

Определение траекторий перемещения материальных частиц вдоль линии тока.

Уравнение траектории перемещения материальной частицы в деформируемом объёме блока i материала заготовки в общем виде можно записать следующим образом [12]

$$z = f(r, R_{Tni}, Z_{Tni}, t) \text{ или } r = f(z, R_{Tni}, Z_{Tni}, t),$$

где r , z и R_{Tni} , Z_{Tni} – соответственно, текущие конечные и начальные координаты перемещения частицы металла в блоке i ;

t – время, за которое материальная частица перемещается из точки (R_{Tni}, Z_{Tni}) в точку (r, z) .

Конечные координаты r и z можно также обозначать через $R_{\delta ei}$ и $Z_{\delta ei}$.

Для стационарных процессов течения траектории движения частиц совпадают с линиями тока, которые можно определить, решая следующую систему дифференциальных уравнений [7]

$$\frac{dr}{V_{ri}} = \frac{dz}{V_{zi}} = \frac{dS}{V_a} = dt, \quad (1)$$

где dr , dz – компоненты элементарного перемещения частицы металла за время dt ;
 dS – соответствующее компонентам dr , dz перемещение активного пуансона со скоростью V_a ;

V_{zi} и V_{ri} – компоненты поля скоростей в блоке i .

После интегрирования выражения (1) в соответствующих пределах получаются следующие выражения [7]

$$\int_{R_{Tni}}^r \frac{dr}{V_{ri}} = \int_{Z_{Tni}}^z \frac{dz}{V_{zi}} = \frac{\Delta S}{V_a} = t \text{ или } V_a \int_{R_{Tni}}^r \frac{dr}{V_{ri}} = V_a \int_{Z_{Tni}}^z \frac{dz}{V_{zi}} = \Delta S = V_a t, \quad (2)$$

где $\Delta S = S_{\delta ei} - S_{\delta e}$ – величина хода активного пуансона от своего текущего начального положения $S_{\delta ei}$ до текущего конечного положения S_{TK} ;

t – время, за которое активный пуансон совершает ход ΔS , а материальная частица металла перемещается из точки (R_{Tni}, Z_{Tni}) в точку (r, z) .

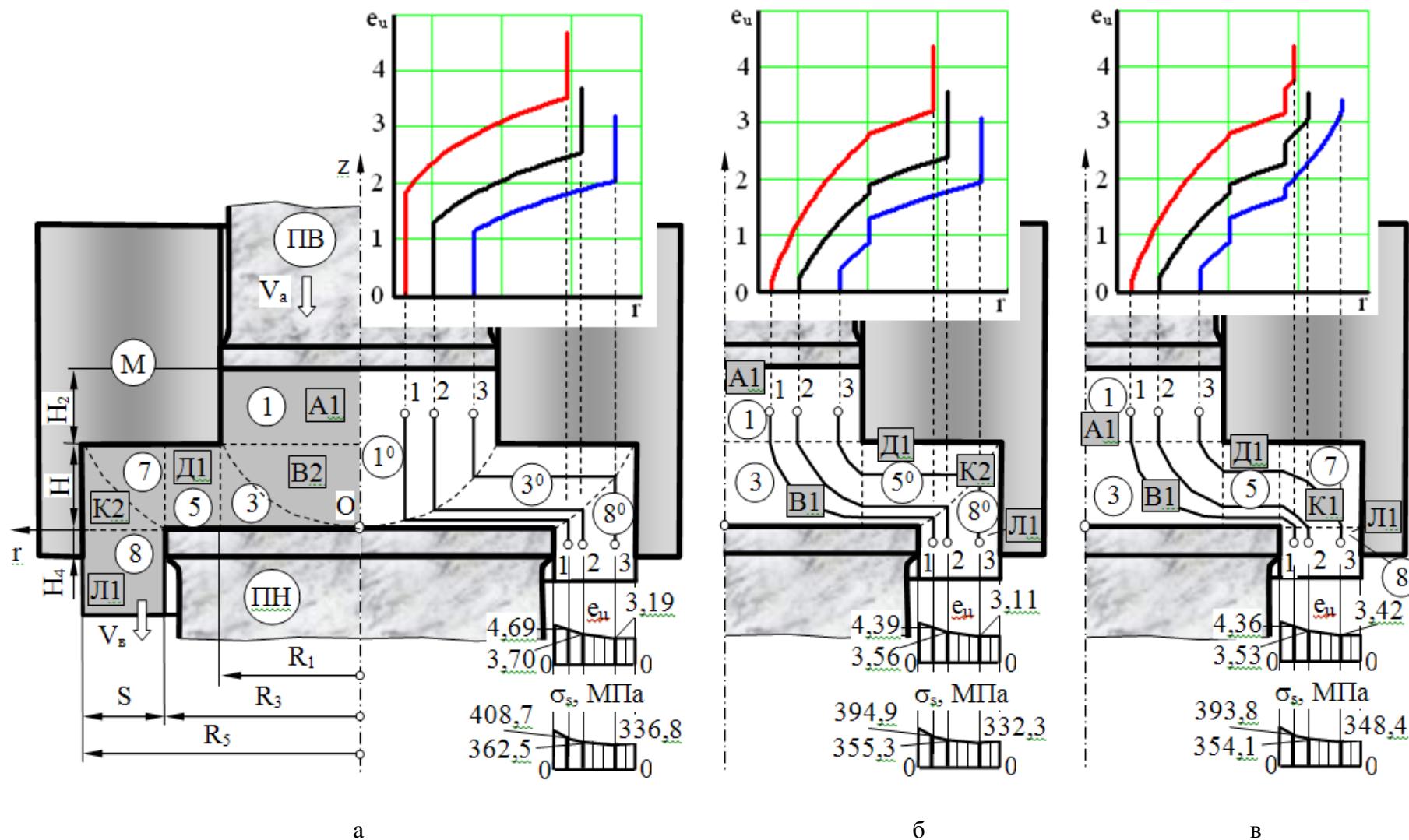


Рис. 1. Расчётные схемы процесса комбинированного радиально-прямого выдавливания

Систему уравнений (2) можно разбить на два уравнения, соответственно, для компонент скорости V_{ri} и V_{zi} [12]:

$$\Delta S = V_a \int_{R_{Tni}}^r \frac{dr}{V_{ri}}; \quad (3)$$

$$\Delta S = V_a \int_{Z_{Tni}}^z \frac{dz}{V_{zi}}. \quad (4)$$

Подстановка компонент скорости рассматриваемого блока i в соответствующие выражения (3) и (4) и интегрирование данных выражений в указанных пределах даёт возможность получить формулы в параметрической форме, позволяющие, с одной стороны, вычислить величину хода активного пуансона ΔS , необходимого для перемещения материальной частицы из точки (R_{Tni}, Z_{Tni}) в точку (r, z) блока i , а с другой стороны, рассчитать текущие конечные координаты r, z движения материальной точки в зависимости от её текущих начальных координат R_{Tni}, Z_{Tni} и хода пуансона ΔS .

Если известны координаты материальной частицы на входе в очаг деформации (в блоке 1^0), то можно рассчитать для расчётной схемы 1 (рис. 1, а) координаты данной частицы на границах и внутри рассматриваемых модулей при движении вдоль линии тока (табл. 1). А можно решить и обратную задачу (табл. 1). Аналогичные вычисления были сделаны и для расчётных схем 2 и 3, однако они в табл. 1 не представлены.

Если необходимо определить координату r материальной частицы на выходе из очага деформации (для модулей $i = 8^0$) без расчёта промежуточных координат точек вдоль линии тока и при этом известна координата \bar{R}_{Tnj} материальной частицы на входе в очаг деформации (для блока $j = 1^0$), то можно воспользоваться формулой

$$\bar{R}_{Tki} = \sqrt{\bar{R}_5^2 - \frac{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} (1 - \bar{R}_{Tnj}^2)}. \quad (5)$$

Если решается обратная задача, то в этом случае необходимо воспользоваться формулой

$$\bar{R}_{Tnj} = \sqrt{\bar{R}_0^2 + \frac{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} (\bar{R}_{Tki}^2 - \bar{R}_3^2)}. \quad (6)$$

Выражения (5) и (6) можно использовать для расчёта координаты r точки в каждой из трёх расчётных схем (см. рис. 1), т.е. различное КВПС в рассматриваемых модулях расчётных схем не влияет на искомую координату r точки. Эти выражения были получены на основе формул, приведенных в табл. 1.

В качестве примера были выбраны следующие натуральные значения геометрических параметров процесса радиально-прямого выдавливания (см. обозначения параметров на рис. 1, а): $R_0=0$ мм; $R_1=25$ мм; $R_2=35$ мм; $R_3=50$ мм; $H=15$ мм. Тогда их относительные значения: $\bar{R}_0 = \frac{R_0}{R_1} = 0$; $\bar{R}_1 = \frac{R_1}{R_1} = 1$; $\bar{R}_2 = \frac{R_2}{R_1} = 1,4$; $\bar{R}_3 = \frac{R_3}{R_1} = 2$; $\bar{H} = \frac{H}{R_1} = 0,6$. Для трёх материальных частиц (1, 2 и 3), выделенных в блоках 1 или 1^0 трёх схем (см. рис. 1, а), имеющих, соответственно, начальные координаты в натуральных значениях (7,5; 20), (12,5; 20), (20; 20) или относительные координаты (0,3; 0,8), (0,5; 0,8), (0,8; 0,8), построены их траектории перемещения вдоль соответствующих линий тока по формулам, представленным в табл. 1. Расчёты были сделаны с привлечением математического пакета MathCAD после составления соответствующих программ.

Таблица 1

Уравнения траекторий перемещения частиц в кинематических модулях вдоль линии тока

Из точки	В точку	Последовательность расчёта координат точек в модулях вдоль линии тока
$(r_{ТН1^0}; z_{ТН1^0})$	$(r_{ТК8^0}; z_{ТК8^0})$	$\begin{pmatrix} \bar{R}_{ТН1^0}; \\ \bar{Z}_{ТН1^0} \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{r = \bar{R}_{ТН1^0} = \bar{R}_{к1^0} \\ z = \bar{Z}_{ТН1^0} \dots \bar{Z}_{к1^0}}} \begin{pmatrix} \bar{R}_{Н3^0} = \bar{R}_{к1^0}; \\ \bar{Z}_{Н3^0} = \bar{Z}_{к1^0} = \frac{\bar{R}_{Н3^0}^2 - \bar{R}_0^2}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} \bar{H} \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{z = \bar{Z}_{Н3^0} = \bar{Z}_{к3^0}}} \begin{pmatrix} \bar{R}_{ТН1^0}; \bar{Z}_{ТН1^0} \end{pmatrix}$ $\xrightarrow{\substack{r = \bar{R}_{Н8^0} = \bar{R}_{ТК8^0} \\ z = \bar{Z}_{Н8^0} \dots \bar{Z}_{ТК8^0}}} \begin{pmatrix} \bar{R}_{ТК8^0}; \\ \bar{Z}_{ТК8^0} \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \bar{R}_{Н8^0} = \bar{R}_{к3^0} = \sqrt{\frac{\bar{R}_3^2 (\bar{H} - \bar{Z}_{к3^0}) + \bar{R}_5^2 \bar{Z}_{к3^0}}{\bar{H}}}; \\ \bar{Z}_{Н8^0} = \bar{Z}_{к3^0} \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{r = \bar{R}_{Н8^0} = \bar{R}_{ТК8^0} \\ z = \bar{Z}_{Н8^0} \dots \bar{Z}_{ТК8^0}}} \begin{pmatrix} \bar{R}_{ТК8^0}; \\ \bar{Z}_{ТК8^0} \end{pmatrix}$
$(r_{ТК8^0}; z_{ТК8^0})$	$(r_{ТН1^0}; z_{ТН1^0})$	$\begin{pmatrix} \bar{R}_{ТК8^0}; \\ \bar{Z}_{ТК8^0} \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{r = \bar{R}_{ТК8^0} = \bar{R}_{Н8^0} \\ z = \bar{Z}_{ТК8^0} \dots \bar{Z}_{Н8^0}}} \begin{pmatrix} \bar{R}_{к3^0} = \bar{R}_{Н8^0}; \\ \bar{Z}_{к3^0} = \bar{Z}_{Н8^0} = \frac{\bar{R}_{к3^0}^2 - \bar{R}_3^2}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \bar{H} \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{r = \bar{R}_{к3^0} \dots \bar{R}_{Н3^0} \\ z = \bar{Z}_{к3^0} = \bar{Z}_{Н3^0}}} \begin{pmatrix} \bar{R}_{к3^0} \dots \bar{R}_{Н3^0}; \\ \bar{Z}_{к3^0} = \bar{Z}_{Н3^0} \end{pmatrix}$ $\xrightarrow{\substack{r = \bar{R}_{к1^0} = \bar{R}_{ТН1^0} \\ z = \bar{Z}_{к1^0} \dots \bar{Z}_{ТН1^0}}} \begin{pmatrix} \bar{R}_{ТН1^0}; \\ \bar{Z}_{ТН1^0} \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \bar{R}_{к1^0} = \bar{R}_{Н3^0} = \sqrt{\frac{\bar{R}_0^2 (\bar{H} - \bar{Z}_{Н3^0}) + \bar{Z}_{Н3^0}}{\bar{H}}}; \\ \bar{Z}_{к1^0} = \bar{Z}_{Н3^0} \end{pmatrix} \xrightarrow{\substack{r = \bar{R}_{к1^0} = \bar{R}_{ТН1^0} \\ z = \bar{Z}_{к1^0} \dots \bar{Z}_{ТН1^0}}} \begin{pmatrix} \bar{R}_{ТН1^0}; \\ \bar{Z}_{ТН1^0} \end{pmatrix}$

Определение накопленной деформации и напряжения текучести материальной частицей вдоль линии тока.

Интенсивность накопленной деформации для установившегося процесса пластического течения вдоль линии тока в конце модуля j , предшествующего модулю i , определяется по формуле

$$e_{укj} = e_{утj} \left| \begin{array}{l} r = R_{\kappa j} = R_{ni} \\ z = Z_{\kappa j} = Z_{ni} \end{array} \right. , \quad (7)$$

где $e_{утj}$ – интенсивность накопленной деформации материальной частицей в её текущем положении в модуле (блоке) j ;

r, z – текущие координаты перемещения частицы металла;

$R_{\kappa j}, Z_{\kappa j}$ и R_{ni}, Z_{ni} – соответственно, конечные координаты перемещения материальной точки в модуле j и её начальные координаты движения в модуле i .

Тогда интенсивность накопленной деформации в модуле i , следующего в расчётной схеме за модулем j , в общем виде можно определить по формуле

$$e_{uti} = e_{укj} + [e_{uij}] + e_{ui} , \quad (8)$$

где $e_{укj}$ – определяется по формуле (7);

$[e_{uij}]$ – приращение интенсивности деформации на границе между блоками i и j (элементами внутри блоков);

e_{ui} – величина накопленной деформации в текущем положении материальной частицы блока i (элемента внутри модуля).

На выходе из очага деформации интенсивность деформации e_u , накопленная отдельной материальной частицей при прохождении всего очага деформации, приобретает значение $e_u = e_{uti}|_{i=I}$ (где I - количество модулей в расчётной схеме).

Величину $[e_{uij}]$, учитывающей дополнительные приращения деформации у материальной частицы при пересечении границы между модулями i и j (элементами внутри блоков), рассчитывают по формуле [13]

$$[e_{uij}] = \frac{|V_{\tau ij}|}{\sqrt{3}|V_{ni j}|} \left| \begin{array}{l} r = R_{\kappa j} = R_{ni} \\ z = Z_{\kappa j} = Z_{ni} \end{array} \right. , \quad (9)$$

где $V_{\tau ij}, V_{ni j}$ – соответственно, величина разрыва касательной компоненты скорости перемещения и нормальная компонента скорости перемещения на границе между модулями i и j (элементами внутри блоков).

Величину e_{ui} в пределах пластического модуля i определяют по одному из выражений [13]

$$e_{ui} = \left| \int_{R_{ni}}^r \dot{\epsilon}_{ui} \frac{dr}{V_{ri}} \right| \text{ или } e_{ui} = \left| \int_{Z_{ni}}^z \dot{\epsilon}_{ui} \frac{dz}{V_{zi}} \right| , \quad (10)$$

где $\dot{\epsilon}_{ui}$ – интенсивность скоростей деформаций для модуля i .

При раскрытии интегралов в формулах (10) требуется получить аналитические выражения. Если в рассматриваемом осесимметричном модуле i величина сдвиговой деформации $\dot{\gamma}_{rzi} = 0$ и можно определить наибольшую из компонент скорости относительной деформации, то можно произвести линеаризацию выражения интенсивности скоростей деформации $\dot{\varepsilon}_{ui}$ по формуле [13]

$$\dot{\varepsilon}_{ui} = 1,08 \left| \dot{\varepsilon}_{\max i} \right|.$$

В итоге были получены выражения для расчёта интенсивности накопленной деформации e_{uTi} в модуле i (табл. 2). Эти выражения были получены с учётом того, что в процессе деформации рассматриваемая материальная частица начинает своё движение вдоль линии тока из жёсткого элемента (модуля) 1^0 , т.е. известны начальные координаты материальной частицы r_{Tn1}^0 . Поэтому в этом случае при движении материальной частицы вдоль линии тока и попадании её в модуль i ранее рассчитанной будет точка (r_{ni}, z_{ni}) , а искомой – точка (r, z) .

Итоговые выражения для каждой из расчётных схем (см. рис. 1), представленные в табл. 3, позволяют рассчитать интенсивность накопленной деформации e_{uTi} материальной частицей после выхода её из очага деформации (в модуле 8^0), если известны при этом её координаты r_{TK8}^0, z_{TK8}^0 . Поэтому при выводе формул для расчёта $e_{u\delta i}$ в модулях, занимающих промежуточное положение между модулями 1^0 и 8^0 , исходили из того, что известной будет точка (r_{ki}, z_{ki}) , а искомой – точка (r, z) .

Аналогичные вычисления были сделаны и для расчётных схем 2 и 3, однако они в табл. 2 и 3 не представлены.

Итоговые выражения для схемы 1, представленные в табл. 2 и 3, связаны между собой. Так, подставляя в итоговые формулы табл. 2 вместо $r_{\delta i 1^0}$ выражения (6), можно получить соответствующие итоговые формулы табл. 3. И наоборот, подставляя в итоговые формулы табл. 3 вместо r выражение (5), можно получить соответствующие итоговые формулы табл. 2.

Формулы для расчёта $e_{u\delta i}$, представленные в табл. 2, позволяют рассчитать накопленную деформацию материальной частицей в любой точке линии тока как в зависимости от координаты r данной точки, так и в зависимости от хода пуансона.

Для трёх точек, выделенных в трёх расчётных схемах (см. рис. 1), траектории перемещения которых рассмотрены ранее, рассчитаны накопленные деформации e_u вдоль линии тока в зависимости от координаты r материальных частиц и представлены на графиках зависимости $e_u = f(r)$. Вертикальные отрезки на этих кривых свидетельствуют о величине приращения интенсивности деформации на границах между соседними модулями. Кроме этого, для каждой из расчётных схем построены эпюры распределения накопленной деформации e_u и истинного напряжения σ_s по поперечному сечению стенки выдавленного стакана с отображением численных значений для трёх рассматриваемых точек (см. рис. 1). В качестве деформируемого материала был принят алюминиевый сплав АД31. Экспериментальная кривая упрочнения была аппроксимирована степенной функцией

$$\sigma_s = \sigma_T + C e_u^n, \quad (11)$$

Таблица 2

Данные для расчёта накопленной деформации в модулях и полученные аналитически выражения

j	i	$e_{укj}$	$[e_{uij}]$	e_{ui}	e_{uti}
1°	3°	0	$[e_{u3^0 1^0}]$	e_{u3^0}	$\frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{2\bar{R}_{\text{тн}1^0}\bar{H}}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} + \frac{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2}{2\bar{R}_{\text{тн}1^0}\bar{H}} \right] + 1,08 \ln \left(\frac{r}{\bar{R}_{\text{тн}1^0}} \right)$, где $r = \bar{R}_{\text{тн}1^0} \dots \sqrt{\bar{R}_5^2 - \frac{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} (1 - \bar{R}_{\text{тн}1^0}^2)}$
3°	8°	$e_{uт3^0} \left\{ \begin{array}{l} r = \bar{R}_{\kappa3^0} = \\ = \bar{R}_{\text{н}8^0} = \\ = \bar{R}_{\text{тк}8^0} \end{array} \right.$	$[e_{u8^0 3^0}]$	e_{u8^0}	$1,08 \ln \left[\frac{\sqrt{\bar{R}_5^2 (\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2) - (\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2) (1 - \bar{R}_{\text{тн}1^0}^2)}}{\sqrt{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} \bar{R}_{\text{тн}1^0}} \right] +$ $+ \frac{1}{2\sqrt{3}} \left[\frac{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2}{\sqrt{\bar{R}_5^2 (\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2) - (\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2) (1 - \bar{R}_{\text{тн}1^0}^2)}} \frac{\sqrt{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2}}{\bar{H}} + \frac{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2}{\bar{R}_{\text{тн}1^0} \bar{H}} \right] +$ $+ \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\bar{R}_{\text{тн}1^0} \bar{H}}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} + \frac{\sqrt{\bar{R}_5^2 (\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2) - (\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2) (1 - \bar{R}_{\text{тн}1^0}^2)}}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \frac{\bar{H}}{\sqrt{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2}} \right]$, где $\bar{R}_{\text{тн}1^0} = \bar{R}_0 \dots 1$

Таблица 3

Данные для расчёта накопленной деформации в модуле и полученные аналитически выражения

j	i	e_{ukj}	$[e_{uij}]$	e_{ui}	e_{uti}
1°	3°	0	$[e_{u3^0 1^0}]$	e_{u3^0}	$\frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{2\bar{R}_{н3^0} \bar{H}}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} + \frac{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2}{2\bar{R}_{н3^0} \bar{H}} \right] + 1,08 \ln \left(\frac{r}{\bar{R}_{н3^0}} \right)$
3°	8°	$e_{uт3^0} \left \begin{array}{l} r \\ \bar{Z}_{н3^0} = \\ = \bar{Z}_{к3^0} \end{array} \right.$	$[e_{u8^0 3^0}]$	e_{u8^0}	$1,08 \ln \left(\frac{\sqrt{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} r}{\sqrt{\bar{R}_0^2 (\bar{R}_5^2 - r^2) + r^2 - \bar{R}_3^2}} \right) + \frac{1}{2\sqrt{3}} \left[\frac{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2}{\sqrt{\bar{R}_0^2 (\bar{R}_5^2 - r^2) + r^2 - \bar{R}_3^2}} \frac{\sqrt{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2}}{\bar{H}} + \right.$ $\left. + \frac{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2}{r \bar{H}} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{r \bar{H}}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} + \frac{\sqrt{\bar{R}_0^2 (\bar{R}_5^2 - r^2) + r^2 - \bar{R}_3^2}}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} \frac{\bar{H}}{\sqrt{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2}} \right]$

где σ_T – предел текучести материала, $\sigma_T = 79,3$ МПа,

C , n – постоянные материала (коэффициенты), определяемые из кривой упрочнения, $C = 122,5$ МПа, $n = 0,64$.

После подстановки рассчитанных значений параметра e_u для каждой из рассматриваемых материальных частиц в данное выражение были определены значения сопротивления деформированию σ_s для этих частиц. Как видно из построенных эпюр, наибольшие значения параметров e_u и σ_s получены для слоёв материала заготовки вблизи внутреннего радиуса R_2 стакана, а наименьшие – для слоёв вблизи внешнего радиуса R_3 .

Определение силовых параметров деформирования упрочняющегося материала.

В способах холодной обработки давлением в процессе формоизменения происходит упрочнение материала заготовки, что приводит к увеличению энергосиловых параметров и непрерывному возрастанию величины напряжения текучести σ_s .

Если умножить левую и правую части формулы (11) на величину приведенного безразмерного давления \bar{p} , то можно получить следующие выражения

$$\bar{p}\sigma_s = \bar{p}\sigma_T + \bar{p}C e_u^n \text{ или } p = p_0 + p_y, \quad (12)$$

где p – давление деформирования с учётом упрочнения ($p = \bar{p}\sigma_s$);

p_0 – давления деформирования без учёта упрочнения ($p_0 = \bar{p}\sigma_T$);

p_y – составляющая (давление), учитывающая упрочнение материала заготовки в процессе деформации.

Как видно из формул (12), составляющая p_y рассчитывается по формуле

$$p_y = \bar{p}C e_u^n.$$

С другой стороны, давление деформирования p_y , учитывающее упрочнение материала заготовки в процессе деформации, можно определить по формуле

$$p_y = \frac{N_y}{F W_0} = \frac{N_y}{\pi (R_1^2 - R_0^2) W_0}, \quad (13)$$

где N_y – мощность, затрачиваемая на пластическую деформацию в упрочняющемся материале при прохождении линии разрыва;

F – площадь контакта активного деформирующего инструмента с формоизменяемой заготовкой ($F = \pi (R_1^2 - R_0^2)$).

А мощность N_y можно рассчитать таким образом [14, 15]

$$N_y = \int_{F_p} (V_n - V_0) [\Phi([e_u] + e_{u0}) - \Phi(e_{u0})] dF_p, \quad (14)$$

где F_p – поверхность разрыва скоростей;

V_n – абсолютная величина нормальной составляющей скорости к поверхности разрыва;

V_0 – скорость перемещения поверхности разрыва по направлению нормали к поверхности разрыва скоростей;

$[e_u]$ – интенсивность накопленной деформации (скачка), возникающей в элементарном объёме при прохождении линии разрыва скоростей;

e_{u0} – интенсивность накопленной деформации материала до поверхности разрыва скоростей;

$[e_u] + e_{u0}$ – интенсивность накопленной деформации после прохождения поверхности разрыва;

$\Phi(e_u) = \int f(e_u) d e_u$ – интеграл функции упрочнения.

Если поверхностью разрыва скоростей на выходе из очага деформации будет служить координатная поверхность, параллельная оси r , и $V_0 = 0$, то с учётом формул (13) и (14) составляющая p_y после несложных преобразований будет рассчитываться по формуле

$$p_y = \frac{1}{FW_0} \int_{R_H}^{R_K} \int_0^{2\pi} r |V_n| \int_0^{e_u} C e_u^n d e_u d \theta d r = \frac{2}{R_3^2 - R_2^2} \frac{C}{n+1} \int_{R_2}^{R_3} r e_u^{n+1} d r, \quad (15)$$

где R_H и R_K – соответственно, начальная и конечная координата r поверхности разрыва скоростей ($R_H = R_2$ и $R_K = R_3$);

$$V_n = -W_0 \frac{R_1^2 - R_0^2}{R_3^2 - R_2^2};$$

e_u – интенсивность накопленной деформации (см. табл. 3).

Тогда с учётом формулы (15) и отмеченных выше значений коэффициентов σ_T , C , n (11) формулу (12) можно переписать следующим образом

$$p = 79,3 \bar{p} + \frac{149,39}{R_3^2 - R_2^2} \int_{R_2}^{R_3} r e_u^{1,64} d r. \quad (16)$$

Выражения для расчёта безразмерного приведенного давления \bar{p} (табл. 4) процесса радиально-прямого выдавливания были получены энергетическим методом после составления уравнения энергетического баланса и последующих несложных преобразований [14].

А усилие деформирования определяется по формуле

$$P = p \pi R_1^2.$$

Теоретические исследования математической модели (16) для трёх расчётных схем (см. рис. 1), описывающих процесс радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала АД31, позволили установить влияние геометрических параметров \bar{R}_3 , \bar{R}_5 , \bar{S} , \bar{S}/\bar{H} , \bar{H} , \bar{H}_2 , \bar{H}_4 и условий трения посредством коэффициента трения μ на давление деформирования p . Результаты этих исследований в виде графиков на рис. 2 были получены после составления соответствующих программ в MathCAD. В расчётах было принято: $\bar{R}_0 = 0$; $\bar{R}_5 = \bar{R}_3 + \bar{S}$; $\mu_1 = \mu_2 = \mu$. Цифрами 1, 2 и 3 на графиках рис. 2 обозначены кривые, имеющие отношение к соответствующим расчётным схемам 1, 2 и 3 на рис. 1, а, б, в. Графическое отображение результатов расчётов на рис. 2 показывает, что наименьшее давление деформирования p характерно для расчётной схемы 1 (см. рис. 1, а), а наибольшее – для расчётной схемы 3 (см. рис. 1, в), что можно объяснить уменьшением количества модулей, на которые разбит деформируемый объём, от расчётной схемы 3 с общим количеством модулей, равным 5, до расчётной схемы 1 с общим количеством блоков, равным 3. Разница между давлениями деформирования, определяемыми расчётными схемами 1 – 3 (см. рис. 1), достигает 180 МПа (см. рис. 2).

Таблица 4

Аналитические выражения для расчёта приведенного давления выдавливания \bar{p} в расчетных схемах

Схема	\bar{p}
1 (см. рис. 1,а)	$1,08 \left(\left 0,5 - k_6 \right + \ln(\bar{R}_3) + \left \frac{\bar{R}_5^2}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \ln\left(\frac{\bar{R}_5}{\bar{R}_3}\right) - 0,5 \right \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{1 - \bar{R}_0}{\bar{H}} + \frac{\bar{S}}{\bar{H}} + \frac{4}{3} \frac{(1 - \bar{R}_0^3)\bar{H}}{(\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2)^2} + \frac{4}{3} \frac{(\bar{R}_5^3 - \bar{R}_3^3)\bar{H}}{(\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2)^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_1 \left(\frac{2\bar{H}_2}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} + \frac{\bar{R}_5 - 1}{\bar{H}} + \frac{2\bar{R}_5(\bar{H} + \bar{H}_4)}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_2 \left(\frac{\bar{R}_3 - \bar{R}_0}{\bar{H}} + \frac{2\bar{R}_3\bar{H}_4}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \right) + \frac{4}{\sqrt{3}} \mu_3 \frac{\bar{R}_0(\bar{H} + \bar{H}_2)}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2},$ <p>где $k_6 = \frac{\bar{R}_0^2}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} \ln\left(\frac{1}{\bar{R}_0}\right)$, если $\bar{R}_0 \neq 0$ и $k_6 = 0$, если $\bar{R}_0 = 0$</p>
2 (см. рис. 1,б)	$1,08 \left(1 + \ln(\bar{R}_3) + \left \frac{\bar{R}_5^2}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \ln\left(\frac{\bar{R}_5}{\bar{R}_3}\right) - 0,5 \right \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{3} \left(1 + \frac{\bar{R}_0}{1 + \bar{R}_0} \right) \frac{1 - \bar{R}_0}{\bar{H}} + \frac{\bar{S}}{\bar{H}} + \frac{4}{3} \frac{(\bar{R}_5^3 - \bar{R}_3^3)\bar{H}}{(\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2)^2} + \frac{\bar{H}}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_1 \left(\frac{2\bar{H}_2}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} + \frac{\bar{R}_5 - 1}{\bar{H}} + \frac{2\bar{R}_5(\bar{H} + \bar{H}_4)}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_2 \left(\frac{1}{3} \left(1 + \frac{\bar{R}_0}{1 + \bar{R}_0} \right) \frac{1 - \bar{R}_0}{\bar{H}} + \frac{\bar{R}_3 - 1}{\bar{H}} + \frac{2\bar{R}_3\bar{H}_4}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_3 \frac{\bar{R}_0(\bar{H} + 2\bar{H}_2)}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2}$
3 (см. рис. 1,в)	$1,08 \left(1,5 + \ln(\bar{R}_3) + \frac{\bar{R}_5^2}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \ln\left(\frac{\bar{R}_5}{\bar{R}_3}\right) \right) + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{3} \left(1 + \frac{\bar{R}_0}{1 + \bar{R}_0} \right) \frac{1 - \bar{R}_0}{\bar{H}} + \frac{1}{3} \left(1 + \frac{\bar{R}_5}{\bar{R}_5 + \bar{R}_3} \right) \frac{\bar{S}}{\bar{H}} + \frac{\bar{H}}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} + \frac{\bar{R}_3\bar{H}}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_1 \left(\frac{2\bar{H}_2}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2} + \frac{\bar{R}_3 - 1}{\bar{H}} + \frac{1}{3} \left(1 + \frac{\bar{R}_5}{\bar{R}_5 + \bar{R}_3} \right) \frac{\bar{S}}{\bar{H}} + \frac{\bar{R}_5(\bar{H} + 2\bar{H}_4)}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_2 \left(\frac{1}{3} \left(1 + \frac{\bar{R}_0}{1 + \bar{R}_0} \right) \frac{1 - \bar{R}_0}{\bar{H}} + \frac{\bar{R}_3 - 1}{\bar{H}} + \frac{2\bar{R}_3\bar{H}_4}{\bar{R}_5^2 - \bar{R}_3^2} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu_3 \frac{\bar{R}_0(\bar{H} + 2\bar{H}_2)}{\bar{R}_1^2 - \bar{R}_0^2}$

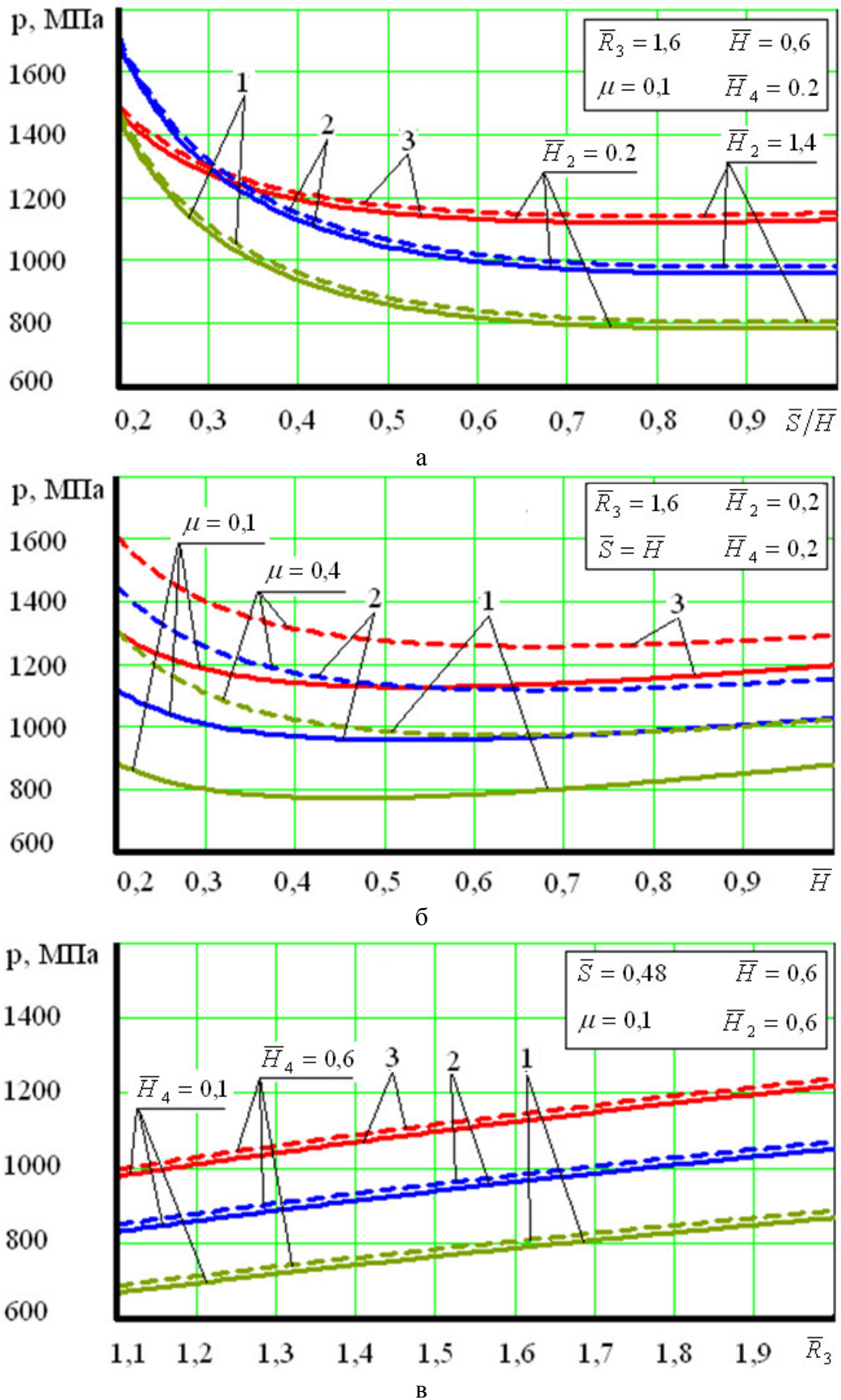


Рис. 2. Графики зависимости давления p радиально-прямого выдавливания от геометрических параметров процесса и условий трения

Как видно из рис. 2, на величину давления деформирования p наибольшее влияние оказывают безразмерный параметр $n = \bar{S}/\bar{H}$ (рис. 2, а), геометрические параметры \bar{H} (рис. 2, б) и \bar{R}_3 (рис. 2, в), а также коэффициент трения μ (рис. 2, б). Однозначно, с увеличением значений коэффициента трения μ и геометрического параметра \bar{R}_3 происходит увеличение давления p (рис. 2, б, в), что связано с ростом энергетических затрат на преодоление сил трения деформируемым материалом заготовки. Увеличение относительного радиуса полости \bar{R}_3 от 1,1 до 2,0 ведёт к росту давления деформирования на 20%. С уменьшением значений параметра n от 0,7 до 0,2 для расчётной схемы 3 и от 0,8 до 0,2 для расчётных схем 1 и 2 происходит увеличение давления деформирования p (см. рис. 2, а), что можно объяснить ростом степени деформации в зоне разворота течения металла с радиального направления на прямое. При значениях параметра n больше 0,7 для расчётной схемы 3 и 0,8 для расчётных схем 1 и 2 значения давления деформирования практически не меняются. В исследуемом диапазоне значений толщины дна стакана \bar{H} от 0,2 до 1,0 для трёх расчётных схем было установлено наличие оптимального значения \bar{H}_{opt} , соответствующего наименьшему значению давления деформирования p (см. рис. 2, б). С ростом коэффициента трения μ от 0,1 до 0,4 оптимальное значение высоты \bar{H}_{opt} изменяется от 0,6 до 0,65 для расчётной схемы 3, от 0,55 до 0,65 – для расчётной схемы 2 и от 0,45 до 0,65 – для расчётной схемы 1. Уменьшение относительной толщины дна стакана от 0,6 до 0,2 приводит к увеличению давления деформирования p на 26%, что можно объяснить увеличением степени деформации в зоне дна полости. Увеличение значений высотных геометрических параметров \bar{H}_2 от 0,2 до 1,4 (см. рис. 2, а) и \bar{H}_4 от 0,1 до 0,6 (см. рис. 2, б) при коэффициенте трения $\mu = 0,1$ не приводит к существенному росту давления деформирования p . Хотя, как показали расчёты, не приведенные на рис. 2, с одновременным увеличением значений коэффициента трения μ и геометрических параметров \bar{H}_2 , \bar{H}_4 происходит более существенный рост давления формоизменения p .

ВЫВОДЫ

1. Представлены уравнения траекторий перемещения на стационарной стадии процесса радиально-прямого выдавливания материальных частиц вдоль линии тока, зависящие от хода пуансона.

2. Приведена последовательность расчёта координат точек в кинематических модулях и на их границах вдоль линии тока при движении материальной частицы из модуля на входе в очаг пластической деформации до выхода из очага деформации, либо, когда известно положение материальной частицы на выходе из очага деформации и необходимо определить её положение на входе в очаг деформации. Зависимости для расчёта уравнений траекторий перемещения материальных частиц в процессе комбинированного последовательного радиально-прямого выдавливания позволяют определить накопленную данными частицами деформацию в любой точке вдоль линии тока.

3. Установлен характер распределения накопленной деформации и истинного напряжения по поперечному сечению стенки выдавленного стакана. Наибольшие значения данных параметров получены для слоёв материала заготовки вблизи внутреннего радиуса стакана, а наименьшие – для слоёв вблизи внешнего радиуса.

4. Получены энергетическим методом формулы для расчёта давления деформирования процесса радиально-прямого выдавливания упрочняющегося материала на стационарной стадии в зависимости от безразмерных геометрических параметров и условий трения. Установлено, что наибольшее влияние на давление деформирования оказывают относительные толщина стенки и дна стакана, внешний и внутренний радиусы полого изделия, а также коэффициент трения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алиева Л. И. Перспективы развития процессов точной объемной штамповки выдавливанием / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // *Вісник ДДМА*. – 2008. – №1 (11). – С. 13–19.
2. Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием / В. М. Авдеев, Л. Б. Аксенов, И. С. Алиев [и др.]; под ред. К. Н. Богоявленского, В. В. Руса, А. М. Шелестова. – Л.: Политехника, 1991. – 351 с.
3. Алиева Л. И. Технологические возможности процессов радиально-прямого выдавливания с раздачей / Л. И. Алиева, О. В. Чучин // *Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство: Материалы международной научно-технической конференции*. – Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСУС». 2015. – С. 148–153.
4. Osen W. Kombiniertes Quer-Hohl-Worwarts-Fließpressen / W. Osen // *Draht*. – 1986. – №3. – S. 133–137.
5. Данилин Г. А. Технологические возможности и рациональные условия реализации процесса продольно-поперечного выдавливания / Г. А. Данилин, Д. С. Филин // *Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: мат. междунар. науч.-техн. конф.* / Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2014. – С. 85–91. – ISBN 978-5-85546-829-8.
6. Алиева Л. И. Экспериментальное исследование процессов штамповки полых деталей / Л. И. Алиева, О. В. Чучин // *Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии. Материалы VI Международной научно-технической конференции*. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2014. – С. 8–10.
7. Чучин О. В. Комбинированное последовательное радиально-прямое выдавливание полых деталей / О. В. Чучин, Л. И. Алиева // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр.* – Краматорськ: ДДМА, 2002. – С. 352–355.
8. Алиева Л. И. Выбор кинематических модулей для определения силовых параметров радиального выдавливания / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць*. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – № 3 (5). – С. 108–113.
9. Алиева Л. И. Анализ процесса последовательного радиально-прямого выдавливания методом кинематических модулей / Л. И. Алиева, О. В. Чучин // *Научный вестник ДГМА. Сборник научн. трудов*. – Краматорск: ДГМА. 2015. – № 3 (18E). – С. 5–22. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963\(18%D0%95\)_2015/article/3.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/%E2%84%963(18%D0%95)_2015/article/3.pdf)
10. Чучин О. В. Течение упрочняющегося материала при комбинированном радиально-прямом выдавливании / О. В. Чучин, Л. И. Алиева, А. И. Лобанов // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр.* – Луганськ: СНУ, 2001. – С. 37–44.
11. Алиев И. С. Моделирование процесса радиально-прямого выдавливания полых деталей из упрочняющегося материала / И. С. Алиев, О. В. Чучин, П. Абхари // *Вестник ДГМА*. – 2005. – №2. – С. 24–29.
12. Шестаков Н. А. Энергетические методы расчёта процессов обработки металлов давлением: учебное пособие / Шестаков Н. А. – М.: МГИУ, 1998. – 125 с.
13. Степанский Л. Г. Расчёты процессов обработки металлов давлением / Л. Г. Степанский. – М.: Машиностроение, 1979. – 215 с.
14. Деордиев Н. Т. Пластическое течение упрочняющегося материала в конической матрице / Н. Т. Деордиев, В. Д. Коробкин, П. Д. Чудаков // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1970. – №1. – С. 8–10.
15. Чудаков П. Д. Упрочнение при пластической обработке металлов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 1981. – №4. – С. 139–143.