

УДК 539.374; 621.983

Яковлев С. С.  
Платонов В. И.  
Пасынков А. А.

## ОЦЕНКА СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВОЙ ОПЕРАЦИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫТЯЖКИ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА НА РАДИАЛЬНОЙ МАТРИЦЕ В РЕЖИМЕ ПОЛЗУЧЕСТИ

Вытяжка является одной из наиболее распространенных операций листовой штамповки для изготовления цилиндрических изделий с толстым дном и тонкой стенкой. Интенсификация процесса глубокой вытяжки может быть достигнута комбинированной вытяжкой, которая характеризуется одновременным изменением диаметра вытягиваемой заготовки и толщины стенки. Этот метод позволяет получать изделия с повышенными точностными характеристиками, более упрочненной стенкой, достигать больших степеней деформации по сравнению с методами вытяжки и вытяжки с утонением, что приводит к значительному сокращению числа операций технологического процесса [1].

Листовой материал, подвергаемый штамповке, как правило, обладает анизотропией механических свойств, обусловленной маркой материала и технологическими режимами его получения. Анизотропия механических свойств материала заготовки может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов обработки металлов давлением [2–4], реализуемых при различных температурно-скоростных режимах деформирования.

Теоретические исследования силовых и деформационных параметров первой операции комбинированной вытяжки цилиндрических изделий из изотропного и анизотропного, неупрочняющегося и упрочняющегося материалов выполнены в работах [1–3].

Целью работы является теоретическое исследование кинематики течения, напряженного и деформированного состояний, силовых режимов первой операции изотермической комбинированной вытяжки цилиндрических деталей из трансверсально-изотропного материала через радиальную матрицу в режиме ползучести.

Процесс формоизменения на первой операции комбинированной вытяжки условно разделяется на четыре стадии [1]. В очаге деформации имеется плоское напряженное (зона I) и плоское деформированное (зона II) состояния заготовки. На первой стадии комбинированной вытяжки осуществляется обычная вытяжка (без утонения) и реализуется плоское напряженное состояние в заготовке (рис. 1, а). На второй стадии происходит формирование зоны утонения II (рис. 1, б). На графиках «сила – путь» это проявляется в резком подъеме кривой «сила – перемещение пуансона». Момент совпадения центра закругления пуансона с верхней кромкой калибрующегося пояска матрицы принимается за начало третьей стадии (рис. 1, в). На третьей стадии имеет место процесс собственно комбинированной вытяжки (с наличием двух зон). На четвертой стадии исчезает зона плоского напряженного состояния I и происходит утонение краевой части заготовки (рис. 1, г).

При комбинированной вытяжке один и тот же материал находится в зоне I в условиях плоского напряженного состояния, а в зоне II – в условиях плоского деформированного состояния.

Рассмотрим первую операцию изотермической комбинированной вытяжки трансверсально-изотропного материала с коэффициентом нормальной анизотропии  $R$  на радиальной матрице с радиусом закругления  $R_M$  и степенью деформации  $\psi = 1 - m_{d1}m_{s1}$  (рис. 2), где  $m_{d1} = r_1/R_0$  – коэффициент вытяжки;  $m_{s1} = s_1/s_0$  – коэффициент утонения;  $r_1$  и  $R_0$  – радиус по срединной поверхности полуфабриката и начальный радиус заготовки;  $s_1$  и  $s_0$  – толщина полуфабриката и заготовки соответственно.

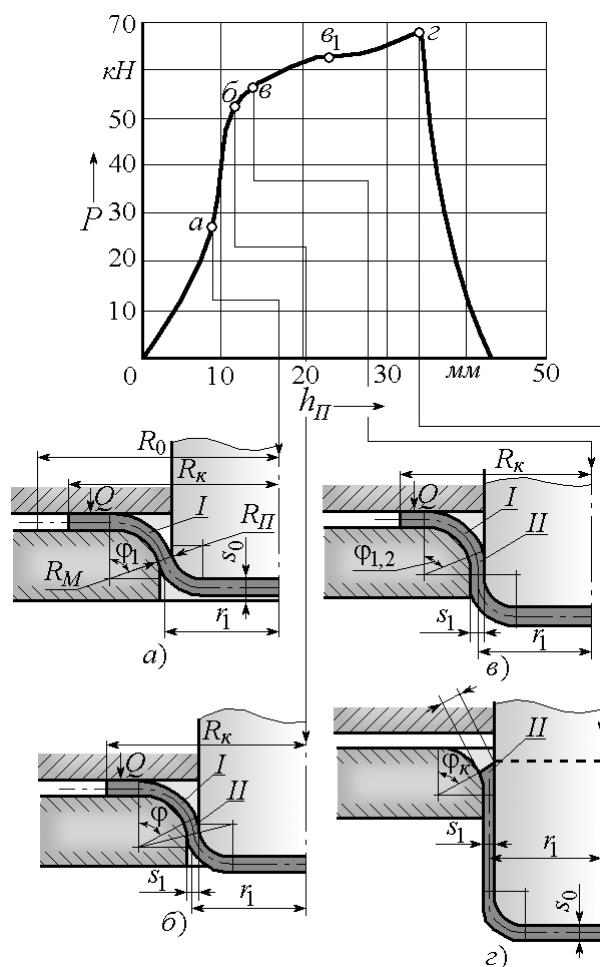


Рис. 1. Последовательность деформирования на первой операции комбинированной вытяжки

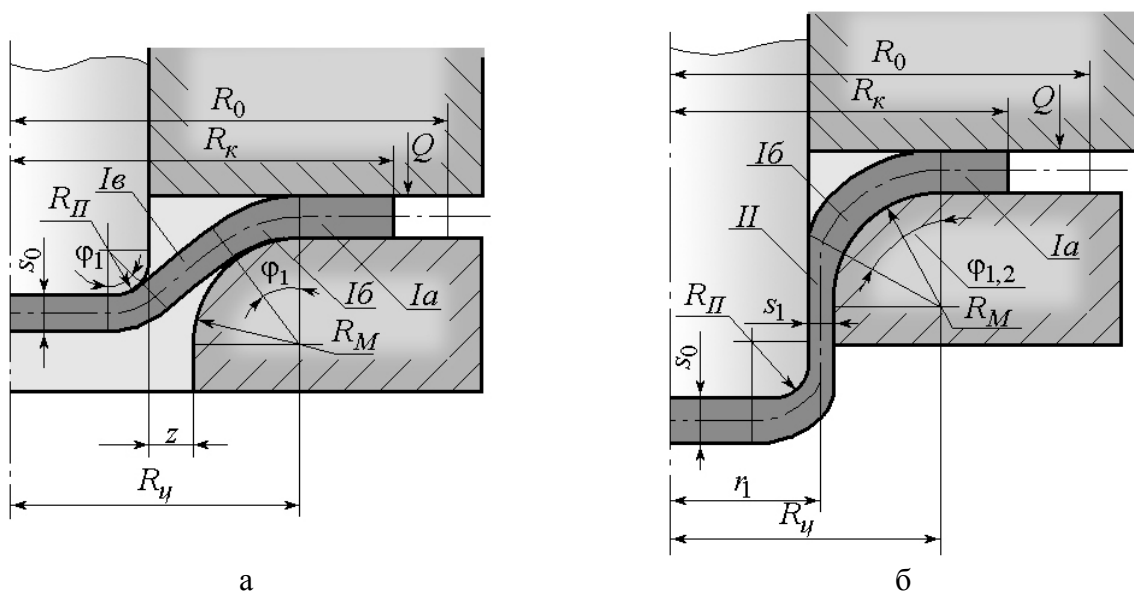


Рис. 2. Схема к теоретическому анализу первой и третьей стадий комбинированной вытяжки через радиальную матрицу

Деформирование осуществляется в режиме ползучести. Предполагается существование потенциала скоростей деформации ползучести и справедливость ассоциированного закона течения [2]. В зависимости от температуры и вида материала его поведение может описываться уравнениями состояния энергетической

$$\xi_e^c = B(\sigma_e / \sigma_*)^n / (1 - \omega_A^c)^m; \quad \dot{\omega}_A^c = \sigma_e \xi_e^c / A_{np}^c, \quad (1)$$

или кинетической теориями ползучести и повреждаемости

$$\xi_e^c = B(\sigma_e / \sigma_*)^n / (1 - \omega_e^c)^m; \quad \dot{\omega}_e^c = \xi_e^c / \varepsilon_{e np}^c. \quad (2)$$

Здесь  $B$ ,  $n$ ,  $m$  – константы материала, зависящие от температуры испытаний;  $\varepsilon_e^-$  – величины эквивалентной деформации при вязком течении материала;  $A_{np}^c$ ,  $\varepsilon_{e np}^c$  – удельная работа разрушения и предельная эквивалентная деформация при вязком течении материала;  $\omega_e^c$ , и  $\omega_A^c$  – повреждаемость материала при вязкой деформации по деформационной и энергетической моделям разрушения соответственно;  $\sigma_*$  – произвольная величина напряжения.

Рассмотрим распределение напряжений в заготовке на первой стадии процесса комбинированной вытяжки при наличии трех характерных участков (рис. 2, а). Очаг деформации состоит из трех участков: участок I а расположен на плоскости матрицы и ограничен краем заготовки с текущей координатой  $R_k$  с одной стороны и постоянной координатой  $R_y$ , точкой сопряжения плоского и криволинейного участков матрицы; участок I б охватывает входную кромку матрицы и ограничен угловыми координатами  $\varphi = 0$  и текущим значением угла охвата заготовкой тороидальной поверхности матрицы  $\varphi$ ; участок I в (участок бесконтактной деформации) расположен между входной кромкой радиальной матрицы и кромкой пуансона.

Принимается, что напряженное состояние плоское ( $\sigma_z = 0$ ); на контактных границах заготовки и рабочего инструмента реализуется закон трения Кулона.

Уравнения связи между скоростями деформаций и напряжениями в цилиндрической системе координат для плоского напряженного состояния имеют вид [2]:

$$\begin{aligned} \xi_\rho &= \frac{3}{2} \frac{\xi_e}{\sigma_e (2+R)} [\sigma_\rho (1+R) - R\sigma_\theta]; \\ \xi_\theta &= \frac{3}{2} \frac{\xi_e}{\sigma_e (2+R)} [\sigma_\theta (1+R) - R\sigma_\rho]; \\ \xi_z &= -\frac{3}{2} \frac{\xi_e}{\sigma_e (2+R)} [\sigma_\rho + \sigma_\theta], \end{aligned} \quad (3)$$

где эквивалентное напряжение  $\sigma_e$  и эквивалентная скорость деформации  $\xi_e$  вычисляются по выражениям

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \left\{ \frac{3}{2} [R(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_\rho^2] / (2+R) \right\}^{1/2}; \\ \xi_e &= \frac{\sqrt{2(2+R)}}{\sqrt{3(2R+1)}} \left\{ R(\xi_\rho - \xi_\theta)^2 + [\xi_\theta(1+R) + R\xi_\rho]^2 + [\xi_\rho(1+R) + R\xi_\theta]^2 \right\}^{1/2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Меридиональные  $\sigma_\rho$  и окружные  $\sigma_\theta$  напряжения на участке I а определяем путем численного решения приближенного уравнения равновесия [6]:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \left( 1 + \frac{\rho ds}{s d\rho} \right) - \sigma_\theta = 0 \quad (5)$$

совместно с уравнением состояния:

$$(1+R)\sigma_\rho^2 + (1+R)\sigma_\theta^2 - 2R\sigma_\rho\sigma_\theta = \frac{2}{3}(2+R)\sigma_e^2, \quad (6)$$

при граничных условиях:

$$\rho = R_k \quad \sigma_\rho = \frac{\mu_M Q}{\pi R_k s_0}, \quad (7)$$

где

$$\sigma_e^2 = \sigma_*^2 \left( \frac{\xi_e}{B} \right)^{2/n} (1 - \omega)^{2m/n}, \quad (8)$$

$\rho$  – текущий радиус рассматриваемой точки;  $R_k \geq \rho \geq R_y$ ;  $R_k$  – радиус края заготовки в рассматриваемый момент времени;  $\mu_M$  – коэффициент трения на контактной поверхности матрицы и прижима;  $Q$  – сила прижима;  $\varepsilon_{np}$  и  $A_{np}$  – предельные степень деформации и удельная работа разрушения материала;  $s$  – текущая толщина заготовки.

При анализе процесса вытяжки без прижима в граничном условии (7) необходимо положить  $Q = 0$ .

Рассмотрим кинематическое и деформированное состояние материала на этом участке.

Скорости деформации в меридиональном, тангенциальном направлениях и по толщине определяются по выражениям:

$$\xi_\rho = \frac{dV_\rho}{d\rho}; \quad \xi_\theta = \frac{V_\rho}{\rho}; \quad \xi_z = \frac{\dot{s}}{s}, \quad (9)$$

где  $s$  – текущая толщина заготовки в процессе деформирования.

Используя уравнение несжимаемости  $\xi_\rho + \xi_\theta + \xi_z = 0$  и уравнения связи скоростей деформаций и напряжений, найдем:

$$\frac{dV_\rho}{d\rho} = -\frac{V_\rho}{\rho}(1+f); \quad f = -\frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{\sigma_\theta(1+R) - R\sigma_\rho}. \quad (10)$$

Уравнение для определения изменения толщины заготовки во фланце запишется как:

$$\frac{ds}{s} = \frac{d\rho}{\rho} f. \quad (11)$$

Для нахождения меридионального  $\sigma_\rho$  и окружного  $\sigma_\theta$  напряжений на тороидальной поверхности матрицы (участок I б) решаем совместно условие равновесия [5]:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\varphi} - \sigma_\rho \left( \frac{\cos\varphi}{a - \sin\varphi} + \mu_M + \frac{ds}{s d\varphi} \right) + \sigma_\theta \frac{\cos\varphi + \mu_M \sin\varphi}{a - \sin\varphi} = 0 \quad (12)$$

и уравнения состояния (6) при граничных условиях

$$\text{при } \varphi = 0 \quad \sigma_\rho = \sigma_{\rho\varphi} \left|_{\rho=R_y} + \sqrt{\frac{2(2+R)}{3(1+R)}} \sigma_e \left|_{\rho=R_y} \cdot \frac{s}{4R_{MC}}, \quad (13)$$

где  $\varphi$  – угол, характеризующий положение рассматриваемого сечения заготовки на тороидальной поверхности матрицы;  $a = R_y / R_{MC}$ ;  $R_{MC} = R_M + 0,5s_0$ ;  $\sigma_{\rho\varphi}$  – величина меридионального напряжения во фланце заготовки (участок I а), вычисленная при  $\rho = R_y$ ;

$\sqrt{\frac{2(2+R)}{3(1+R)}} \sigma_e \left|_{\rho=R_y}$  – сопротивление материала деформированию при  $\rho = R_y$ .

Уравнения для определения меридиональных скоростей и толщины заготовки в данном случае будут иметь вид аналогичный выражениям (9) и (10), где  $V_\rho$  – меридиональная скорость течения.

Уравнения для определения меридиональных скоростей и толщины будут иметь вид:

$$\frac{dV_\rho}{d\varphi} = \frac{V_\rho \cos \varphi}{a - \sin \varphi} (1 + f); \quad \frac{ds}{s} = -\frac{\cos \varphi d\varphi}{a - \sin \varphi} f, \quad (14)$$

где  $V_\rho$  – меридиональная скорость течения.

Распределение меридиональных  $\sigma_\rho$  и окружных  $\sigma_\theta$  напряжений на конусообразном участке бесконтактной деформации определяется путем численного интегрирования уравнения равновесия (5) с уравнением состояния (6) при граничном условии:

$$\rho = R_1, \quad \sigma_\rho = \sigma_{\rho T} \Big|_{\varphi=\varphi_1} + \sigma_e \sqrt{\frac{2(2+R)}{3(1+R)}} \Big|_{\varphi=\varphi_1} \frac{s}{4R_{MC}}. \quad (15)$$

Здесь  $\varphi_1$  – угол, определяющий границу тороидального и конусообразного участков;  $R_1 = R_y - R_{MC} \sin \varphi_1$ ;  $\sigma_{\rho T}$  – меридиональное напряжение на тороидальной поверхности

матрицы, вычисленное при  $\varphi = \varphi_1$ ;  $\sigma_e \sqrt{\frac{2(2+R)}{3(1+R)}} \Big|_{\varphi=\varphi_1}$  – сопротивление материала деформированию при  $\varphi = \varphi_1$ .

В выражении (15) последнее слагаемое учитывает приращение меридионального напряжения, связанное со спрямлением заготовки [6].

Следует отметить, что при  $\varphi = \varphi_{12} = \arcsin \frac{\bar{R}_M + \bar{R}_\Pi + m_{s1}}{\bar{R}_M + \bar{R}_\Pi + 1}$  конусообразный участок I в исчезает. Здесь  $\bar{R}_n = R_n / s_0$ ;  $\bar{R}_M = R_M / s_0$ .

Сила процесса на первой стадии вытяжки при любой глубине вытяжки, определяемой углом  $\varphi$ , находится по формуле:

$$P = 2\pi r s \sigma_{\rho I} \sin \varphi_1, \quad (16)$$

где  $\sigma_{\rho I}$  – величина меридиональных напряжений на конусообразном участке бесконтактной деформации при  $\rho = r$ .

Положение внешнего края  $R_k$  в процессе деформации вычисляется из условия постоянства объема заготовки в зависимости от угла охвата заготовкой тороидальной поверхности матрицы или глубины вытяжки (перемещения пуансона).

Третья стадия процесса комбинированной вытяжки начинает реализовываться с момента полного охвата заготовкой контура закругления пуансона и матрицы и формирования зоны утонения (рис. 1, б).

Расчет меридиональных  $\sigma_\rho$  и окружных напряжений  $\sigma_\theta$  в зоне I очага пластической деформации осуществляется аналогичным образом, как для первой стадии процесса. Величины меридиональной скорости и толщины заготовки на третьей стадии определяются аналогичным образом, как и для первой стадии, по выражениям (9) и (10), где  $V_\rho$  – меридиональная скорость течения. Граничное условие для скорости  $V_\rho$  будет: при  $\rho = r$ ,  $V_\rho = -V_0 s_1 / s_e$ , где  $s_{\%0}$  – текущая толщина материала заготовки при входе в зону II.

Силу процесса комбинированной вытяжки определяем по формуле:

$$P = \pi d_1 s_1 \sigma_x + \pi \mu_\Pi d_\Pi \int_{\rho_1}^{\rho_2} |\sigma_\kappa| d\rho. \quad (17)$$

На этапе формоизменения приращение времени деформирования определяется так:  $dt = d\rho/V_p$ .

Четвертая стадия комбинированной вытяжки начинается, когда концевая часть заготовки входит в зону утонения. Этому моменту соответствует максимальная величина нормального напряжения формоизменения на этой стадии.

Силовые режимы первой операции комбинированной вытяжки исследовались в зависимости от коэффициентов вытяжки  $m_{d1}$ , радиуса закругления матрицы  $R_M$ , условий трения на контактных границах рабочего инструмента и заготовки для ряда листовых материалов, поведение которых описывается энергетической или кинетической теориями ползучести и повреждаемости, механические свойства которых приведены в работе [4]. Расчеты выполнены при постоянной скорости перемещения пуансона  $V_0$  в следующих диапазонах изменения указанных выше технологических параметров:  $m_{d1} = 0,5-0,9$ ;  $\bar{R}_M = 2-16$ ;  $\bar{R}_\Pi = 1-8$ ;  $\mu_M = 0,05-0,1$ ;  $\bar{R}_\Pi = R_\Pi/s_0$ ;  $\bar{R}_M = R_M/s_0$ ;  $m_{s1} = m_{s1np} - 0,9$ ;  $\mu_\Pi = (1-4)\mu_M$ ;  $s_0 = 4$  мм;  $R_\Pi$  – радиус закругления пуансона;  $m_{s1np}$  – предельный коэффициент утонения. Исследовалось изменение относительной силы  $\bar{P} = P/(2\pi r_1 s_0 \sigma_*)$  и напряжений  $\bar{\sigma}_x = \sigma_x/\sigma_*$  на выходе из очага деформации от перечисленных выше технологических параметров.

На рис. 3 приведены зависимости изменения относительных максимальных величин сил  $\bar{P}$  и напряжений  $\bar{\sigma}_x$  на выходе из очага деформации от относительного радиуса закругления матрицы  $\bar{R}_M$  при различных коэффициентах вытяжки  $m_{d1}$ . Расчеты выполнены при  $\mu_\Pi = 2\mu_M = 0,2$ . Показано, что относительная величина силы процесса  $\bar{P}$  с уменьшением относительного радиуса закругления матрицы  $\bar{R}_M$  возрастает. Увеличение коэффициента вытяжки  $m_{d1}$  приводит к уменьшению относительной величины силы  $\bar{P}$ .

Установлено, что относительная величина осевого напряжения  $\bar{\sigma}_x$  растет с уменьшением относительного радиуса закругления матрицы  $\bar{R}_M$ , а также коэффициентов вытяжки  $m_{d1}$  и утонения  $m_{d1}$ . Интенсивность роста тем выше, чем больше степень деформации.

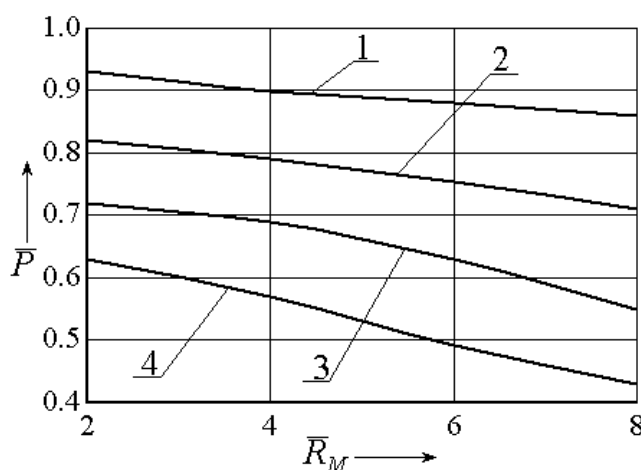


Рис. 3. Зависимости изменения относительной величины  $\bar{P}$  от  $\bar{R}_M$  для алюминиевого сплава АМг6 (450 °С):

кривая 1 –  $m_{d1} = 0,5$ ; кривая 2 –  $m_{d1} = 0,6$ ; кривая 3 –  $m_{d1} = 0,7$ ; кривая 4 –  $m_{d1} = 0,8$ ; ( $V_0 = 0,03$  мм/с;  $m_{s1} = 0,7$ )

Анализ результатов расчетов и графических зависимостей показал, что относительные величины сил  $\bar{P}$  и осевые напряжения  $\bar{\sigma}_x$  на выходе из очага пластической деформации существенно зависят от скорости перемещения пуансона  $V_0$ , коэффициентов вытяжки  $m_{d1}$  и утонения  $m_{d1}$ . С уменьшением коэффициентов вытяжки  $m_{d1}$  и утонения  $m_{d1}$  относительные сила  $\bar{P}$  и напряжения  $\bar{\sigma}_x$  растут (рис. 4 и 5).

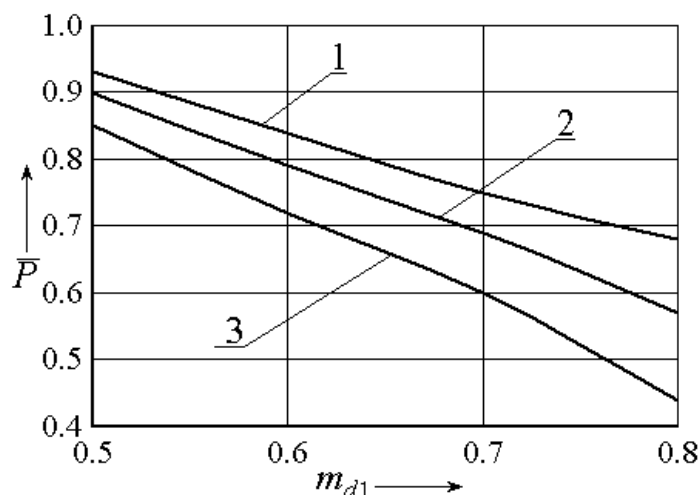


Рис. 4. Зависимости изменения относительной величины  $\bar{P}$  от  $m_{d1}$  для алюминиевого сплава АМг6 (450 °С):

кривая 1 –  $m_{s1} = 0,6$ ; кривая 2 –  $m_{s1} = 0,7$ ; кривая 3 –  $m_{s1} = 0,8$  ( $V_0 = 0,03$  мм/с;  $\bar{R}_M = 4$ ;  $\mu_M = 0,1$ ;  $\mu_{II} = 0,2$ )

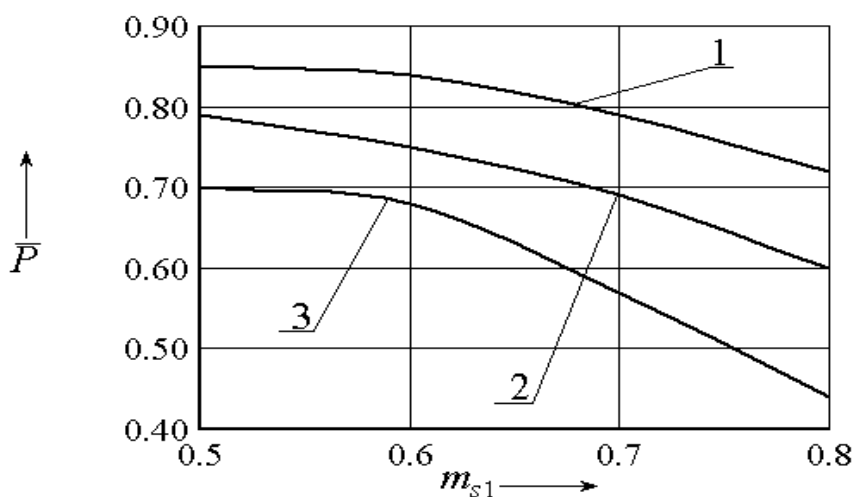


Рис. 5. Зависимости изменения относительной величины  $\bar{P}$  от  $m_{s1}$  для алюминиевого сплава АМг6 (450 °С):

кривая 1 –  $m_{d1} = 0,6$ ; кривая 2 –  $m_{d1} = 0,7$ ; кривая 3 –  $m_{d1} = 0,8$  ( $V_0 = 0,03$  мм/с;  $\bar{R}_M = 4$ ;  $\mu_M = 0,1$ ;  $\mu_{II} = 0,2$ )

Величина максимальной силы процесса  $\bar{P}$  с ростом скорости перемещения пуансона  $V_0$  резко возрастает (рис. 6).

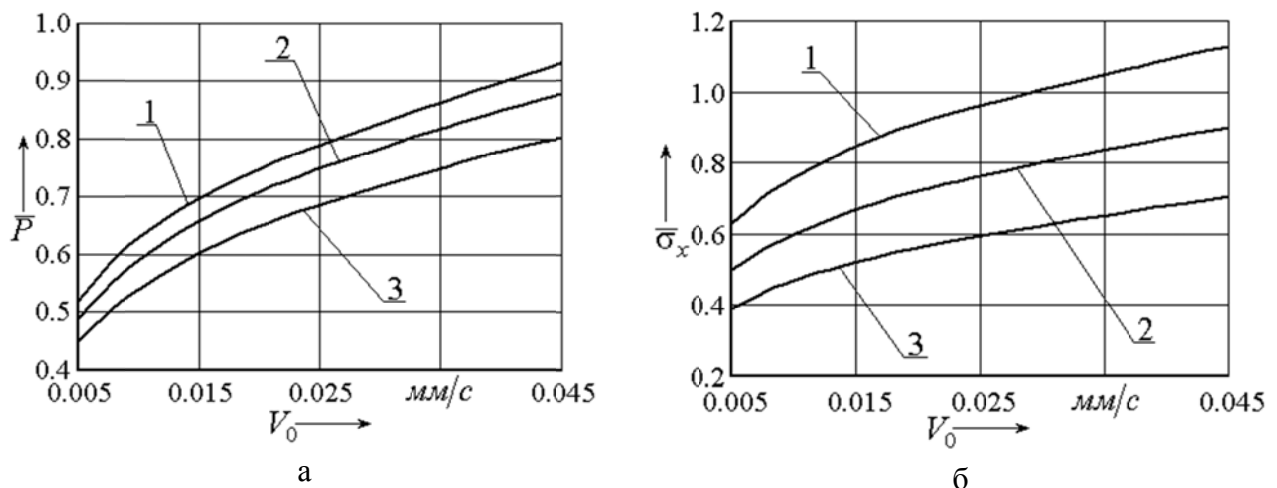


Рис. 6. Зависимости изменения относительных величин  $\bar{P}$  (а) и  $\bar{\sigma}_x$  (б) от  $V_0$  для алюминиевого сплава АМг6 (450 °С):

кривая 1 –  $m_{s1} = 0,6$ ; кривая 2 –  $m_{s1} = 0,7$ ; кривая 3 –  $m_{s1} = 0,8$  ( $m_{d1} = 0,7$ ;  $\bar{R}_M = 4$ ;  $\mu_M = 0,1$ ;  $\mu_{II} = 0,2$ )

Установлено, что с ростом коэффициента трения по пуансону  $\mu_{II}$  (при  $\mu_M = 0,05$ ) величина относительной силы  $\bar{P}$  возрастает, а относительное напряжение  $\bar{\sigma}_x$  падает (рис. 7).

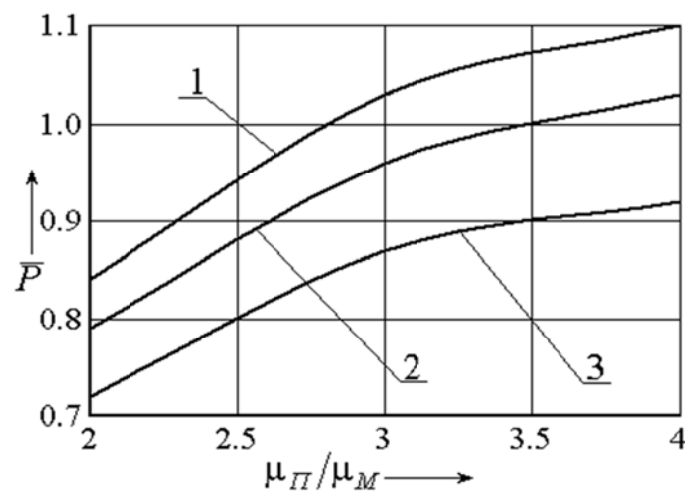


Рис. 7. Зависимости изменения относительной величины  $\bar{P}$  от  $\mu_{II}/\mu_M$  для алюминиевого сплава АМг6 (450 °С):

кривая 1 –  $m_{d1} = 0,5$ ; кривая 2 –  $m_{d1} = 0,6$ ; кривая 3 –  $m_{d1} = 0,7$ ; ( $V_0 = 0,03$  мм/с;  $m_{s1} = 0,6$ ;  $\bar{R}_M = 4$ )

## ВЫВОДЫ

Приведенные выше соотношения могут быть использованы для оценки напряженного и деформированного состояний, силовых режимов изотермической комбинированной вытяжки в радиальных матрицах цилиндрических деталей из трансверсально-изотропного материала в режиме ползучести.

Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Российской Федерации на 2014-2020 годы и гранта РФФИ № 14-08-00066 а.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев С. А. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов / С. А. Валиев – М. : Машиностроение, 1973. – 176 с.
2. Яковлев С. С. Теория и технология штамповки анизотропных материалов / С. С. Яковлев, В. Д. Кухарь, В. И. Трегубов; под ред. С. С. Яковлева – М. : Машиностроение, 2012. – 400 с.
3. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С. С. Яковлев, С. П. Яковлев, В. Н. Чудин, В. И. Трегубов, А. В. Черняев. – М. : Машиностроение, 2009. – 412 с.
4. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / В. А. Голенков, С. П. Яковлев, С. А. Головин, С. С. Яковлев, В. Д. Кухарь; под ред. В. А. Голенкова, С. П. Яковлева. – М. : Машиностроение, 2009. – 442 с.
5. Яковлев С. С. Изотермическая комбинированная вытяжка анизотропных материалов через коническую матрицу в режиме кратковременной ползучести / С. С. Яковлев, В. Ю. Травин, О. В. Пилипенко // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2014. – Вып. 1. – С. 28–32.

## REFERENCES

1. Valiev S. A. Kombinirovannaja glubokaja vytjazhka listovyh materialov / S. A. Valiev – M. : Mashinostroenie, 1973. – 176 s.
2. Jakovlev S. S. Teorija i tehnologija shtampovki anizotropnyh materialov / S. S. Jakovlev, V. D. Kuhar', V. I. Tregubov; pod red. S. S. Jakovleva – M. : Mashinostroenie, 2012. – 400 s.
3. Izotermicheskoe formoizmenenie anizotropnyh materialov zhestkim instrumentom v rezhime kratkovremennoj polzuchesti / S. S. Jakovlev, S. P. Jakovlev, V. N. Chudin, V. I. Tregubov, A. V. Chernjaev. – M. : Mashinostroenie, 2009. – 412 s.
4. Teorija obrabotki metallov davleniem : uchebnik dlja vuzov / V. A. Golenkov, S. P. Jakovlev, S. A. Golovin, S. S. Jakovlev, V. D. Kuhar'; pod red. V. A. Golenkova, S. P. Jakovleva. – M. : Mashinostroenie, 2009. – 442 s.
5. Jakovlev S. S. Izotermicheskaja kombinirovannaja vytjazhka anizotropnyh materialov cherez konicheskuju matricu v rezhime kratkovremennoj polzuchesti / S. S. Jakovlev, V. Ju. Travin, O. V. Pilipenko // Izvestija TulGU. Ser. Tehnicheskie nauki. – Tula : Izd-vo TulGU, 2014. – Вып. 1. – С. 28–32.

Яковлев С. С. – д-р техн. наук, проф. ТулГУ  
Платонов В. И. – канд. техн. наук, доц. ТулГУ  
Пасынков А. А. – канд. техн. наук, доц. ТулГУ

ТулГУ – ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» г. Тула, Россия;  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет учебно-научно-производственный комплекс» г. Орел, Россия.

E-mail: [mpf-tula@rambler.ru](mailto:mpf-tula@rambler.ru)