

УДК 539.374; 621.983

Яковлев С. С.  
Пасынков А. А.  
Нуждин Г. А.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОСЛЕДУЮЩИХ ОПЕРАЦИЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ВЫТЯЖКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ВЯЗКОГО ТЕЧЕНИЯ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА

Вытяжка является одной из наиболее распространенных операций листовой штамповки для изготовления осесимметричных деталей [1–8]. Листовой материал, подвергаемый штамповке, как правило, обладает анизотропией механических свойств, обусловленной маркой материала, технологическими режимами его получения, которая может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов обработки металлов давлением при различных температурно-скоростных режимах деформирования [1–6].

Цель работы – изучение технологических параметров изотермической вытяжки осесимметричных деталей в условиях вязкого течения анизотропного материала.

Рассмотрена последующая операция вытяжки трансверсально-изотропного материала с коэффициентом анизотропии  $R$  в коническую матрицу с углом  $\alpha$ . Напряженное состояние принимается плоским. Деформирование осуществляется в режиме ползучести. Предполагается существование потенциала скоростей деформации ползучести и справедливость ассоциированного закона течения [2, 3].

Очаг деформации в этом случае можно разделить на три участка (рис. 1).

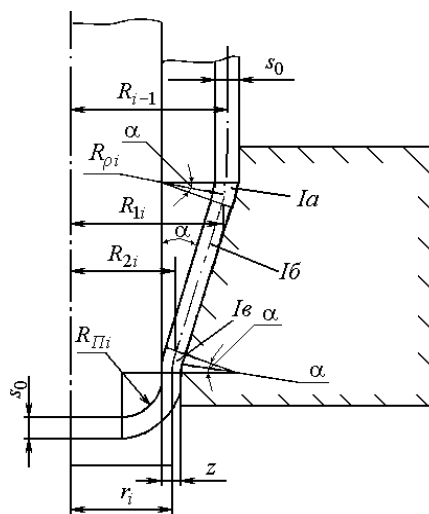


Рис. 1. Схема к теоретическому анализу последующих операций вытяжки через коническую матрицу

Участок  $Ia$ , граничащий со стенками исходной заготовки, в котором срединная поверхность заготовки в меридиональном сечении имеет радиус  $R_{\rho i}$ , а заготовка не соприкасается с поверхностями рабочего инструмента. Участок  $Ib$  – заготовка соприкасается с конической поверхностью матрицы, и участок  $Ic$  – заготовка соприкасается с тороидальной поверхностью матрицы.

В зависимости от температуры и вида материала его поведение может описываться уравнениями состояния кинетической или энергетической теориями ползучести и повреждаемости [3].

Меридиональные  $\sigma_\rho$  и окружные  $\sigma_\theta$  напряжения на участке  $Ia$  определяются путем решения приближенного уравнения равновесия [8]:

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

совместно с уравнением состояния

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

при граничном условии:

$$\rho = R_{i-1}; \quad \sigma_\rho = \sqrt{\frac{2(2+R)}{3(1+R)}} \sigma_e \bigg|_{\rho=R_{i-1}} \cdot \frac{s_0}{4R_{\rho i}}, \quad (3)$$

где

$$\sigma_e^2 = \sigma_*^2 \left( \frac{\xi_e}{B} \right)^{2/n} (1-\omega)^{2m/n}, \quad (4)$$

$\rho$  – текущий радиус рассматриваемой точки;  $\sigma_e$  и  $\xi_e$  – эквивалентное напряжение и эквивалентная скорость деформации [2, 3];  $\omega$  – величина повреждаемости, которая определяется из уравнений  $\Phi$ :

$$\dot{\omega}_e = \frac{\xi_e}{\varepsilon_{np}} \quad \text{или} \quad \dot{\omega}_A = \frac{\sigma_e \xi_e}{A_{np}}, \quad (5)$$

в зависимости от того, какая теория ползучести и повреждаемости описывает поведение материала – кинетическая или энергетическая;  $\varepsilon_{np}$  и  $A_{np}$  – предельные степень деформации и удельная работа разрушения материала;  $B$ ,  $n$ ,  $m$  – константа материала;  $\sigma_*$  – произвольная величина напряжения; величины  $\varepsilon_{np}$ ,  $A_{np}$  и  $B$ ,  $n$ ,  $m$  зависят от температуры деформирования [7–10];  $R_{i-1}$  и  $s_0$  – соответственно начальный радиус заготовки по срединной поверхности и начальная толщина заготовки на  $(i-1)$ -ой операции.

Величина радиуса свободного изгиба приближенно может быть определена по формуле:

$$R_{\rho i} = \frac{\sqrt{R_{i-1} \cdot s_0}}{\sqrt{2} \sin \alpha}. \quad (6)$$

Распределение напряжений на втором ( $Ib$ ) участке очага деформации может быть найдено путем совместного численного решения уравнения равновесия элемента конической поверхности:

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho \left( 1 + \frac{\rho ds}{s d\rho} \right) - \sigma_\theta - \frac{\mu_M \sigma_\theta}{\operatorname{tg} \alpha} = 0. \quad (7)$$

и уравнения состояния (4) при граничном условии:

$$\rho = R_{1i}; \quad \sigma_\rho = \sigma_{\rho Ia} \bigg|_{\rho=R_{1i}} + \sqrt{\frac{2(2+R)}{3(1+R)}} \sigma_e \bigg|_{\rho=R_{1i}} \cdot \frac{s_i}{4R_{\rho i}}, \quad (8)$$

где  $\mu_M$  – коэффициент трения на контактной поверхности матрицы;  $\sigma_{\rho_{1a}}$  – величина меридионального напряжения на первом участке заготовки (участок  $Ia$ ), вычисленная

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

Величина радиуса  $R_{1i}$ , соответствующего границе между первым и вторым участками очага деформации, может быть найдена по геометрическому соотношению [8]:

$$R_{1i} = R_{i-1} - R_{\rho i} (1 - \cos \alpha). \quad (9)$$

Напряжения  $\sigma_\rho$  и  $\sigma_\theta$  на участке  $Ib$  прилегания заготовки к тороидальной поверхности матрицы определяется путем совместного численного решения уравнений равновесия:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\varphi} - \sigma_\rho \left( \frac{\cos \varphi}{a - \sin \varphi} + \mu_M + \frac{ds}{s d\varphi} \right) + \sigma_\theta \frac{\cos \varphi + \mu_M \sin \varphi}{a - \sin \varphi} = 0, \quad (10)$$

с уравнением состояния (4) при граничном условии:

$$\rho = R_{2i}, \quad \sigma_\rho = \sigma_{\rho_{1b}} \left|_{\rho=R_{2i}} + \sqrt{\frac{2(2+R)}{3(1+R)}} \sigma_e \right|_{\rho=R_{2i}} \frac{s_i}{4R_{MC}}. \quad (11)$$

где  $\varphi$  – угол, характеризующий положение рассматриваемого сечения заготовки на тороидальной поверхности матрицы;  $a = R_y / R_{MC}$ ;  $R_{MC} = R_M + 0,5 s_i$ ;  $\sigma_{\rho_{1b}}$  – величина меридионального напряжения на втором участке заготовки (участок  $Ia$ ), вычисленная

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

Сила процесса на последующих операциях вытяжки  $P$  находится по выражению:

$$P = 2\pi r_i s_i \sigma_{\rho_{вых}}, \quad (12)$$

а меридиональное напряжение на выходе из очага пластической деформации  $\sigma_{\rho_{вых}}$  определяются следующим образом:

$$\sigma_{\rho_{вых}} = \sigma_{\rho_{1b}} \left|_{\varphi=\alpha} + \sqrt{\frac{2(2+R)}{3(1+R)}} \sigma_e \right|_{\varphi=\alpha} \frac{s_i}{4R_{MC}}, \quad (13)$$

где  $\sigma_{\rho_{1b}} \left|_{\varphi=\alpha}$  и  $\left. \sqrt{\frac{2(2+R)}{3(1+R)}} \sigma_e \right|_{\varphi=\alpha}$  – величины меридионального напряжения

и сопротивления материала деформированию, вычисленные при  $\varphi = \alpha$ .

Заметим, что в выражениях (8) и (13) последние слагаемые учитывают приращение меридионального напряжения, связанное со спрямлением заготовки [8].

Рассмотрим кинематическое и деформированное состояние материала на участках очага деформации. Условие несжимаемости материала имеет вид:

$$\xi_\rho + \xi_\theta + \xi_z = 0,$$

где

$$\xi_{\rho} = \frac{dV_{\rho}}{d\rho}; \quad \xi_{\theta} = \frac{V_{\rho}}{\rho}; \quad \xi_z = \frac{\dot{s}}{s}. \quad (14)$$

Используя уравнения связи скоростей деформаций и напряжений, найдем:

$$\frac{\xi_z}{\xi_{\theta}} = f = -\frac{\sigma_{\rho} + \sigma_{\theta}}{\sigma_{\theta}(1+R) - R\sigma_{\rho}}. \quad (15)$$

Из уравнения несжимаемости получим уравнение:

$$\frac{dV_{\rho}}{d\rho} = -\frac{V_{\rho}}{\rho}(1+f). \quad (16)$$

Уравнение для определения изменения толщины заготовки запишется как

$$\frac{ds}{s} = \frac{d\rho}{\rho} f. \quad (17)$$

На последующих операциях вытяжки меридиональные  $\sigma_{\rho}$  и окружные  $\sigma_{\theta}$  напряжения на участке пространственного изгиба (участок *Ia*), участке вытяжки на конусе матрицы (участок *Iб*) и на участке прилегания заготовки к тороидальной поверхности матрицы (участок *Iв*) определяются численным интегрированием методом конечных разностей уравнений (1), (7) и (10) совместно с уравнением состояния (4) при граничных условиях (3), (8) и (11) соответственно.

Приведенные выше соотношения для анализа последующих операции изотермической вытяжки без утонения стенки цилиндрической заготовки позволили установить влияние анизотропии механических свойств материала, технологических параметров процесса, скорости перемещения пуансона при  $v_0 = const$ , геометрических размеров заготовки на напряженное и деформированное состояния, силовые режимы исследуемого процесса. С этой целью разработан алгоритм расчета процесса и программное обеспечение для ЭВМ.

Силовые режимы последующих операции изотермической вытяжки исследовались в зависимости от коэффициентов вытяжки  $m_{di}$ , угла конусности матрицы  $\alpha$ , анизотропии механических свойств заготовки (коэффициента нормальной анизотропии  $R$ ) для ряда материалов, поведение которых описывается кинетической и энергетической теориями ползучести и повреждаемости. Механические свойства исследуемых материалов приведены в работах [2, 3].

Расчеты выполнены при постоянной скорости перемещения пуансона  $v_0$  в следующих диапазонах изменения указанных выше технологических параметров:  $m_{di} = 0,7-0,9$ ;  $\alpha = 10-40^\circ$ ;  $\bar{R}_{II} = 2-20$ ;  $\mu_M = 0,05-0,2$ ;  $\bar{R}_{II} = R_{II}/s_0$ ;  $s_0 = 1$  мм;  $R_{II}$  – радиус закругления пуансона.

Графические зависимости изменения относительной максимальной величины силы  $\bar{P}_{max} = P_{max}/(2\pi_i s_0 \sigma_*)$  на последующей операции вытяжки титанового сплава ВТ14 ( $T = 950^\circ$ ), поведение которого описывается кинетической теорией ползучести и повреждаемости, от скорости перемещения пуансона  $v_0$  при фиксированных значениях угла конусности матрицы  $\alpha$  представлены на рис. 2. Расчеты выполнены при  $m_{di} = 0,8$ ;  $\mu_M = 0,1$ ;  $\bar{R}_{II} = 2$ ;  $s_0 = 1$  мм;  $h_z = 100$  мм;  $h_z$  – высота цилиндрической заготовки.

Анализ результатов расчетов показывает, что с увеличением времени деформирования  $t$  в начальный момент формоизменения наблюдается резкий рост величины относительной величины силы  $\bar{P} = P/(2\pi_i s_0 \sigma_*)$  до её максимального значения. Дальнейшее увеличение

времени деформирования  $t$  не приводит к существенному изменению  $\bar{P}$  (стационарный очаг деформации при наличии всех участков) с последующим плавным уменьшением величины относительной силы  $\bar{P}$ . Показана существенная разница по силовым режимам вытяжки, определенным с введением повреждаемости в уравнение состояния (5) и без учета её. Эта разница в отдельных случаях может составлять до 35 %.

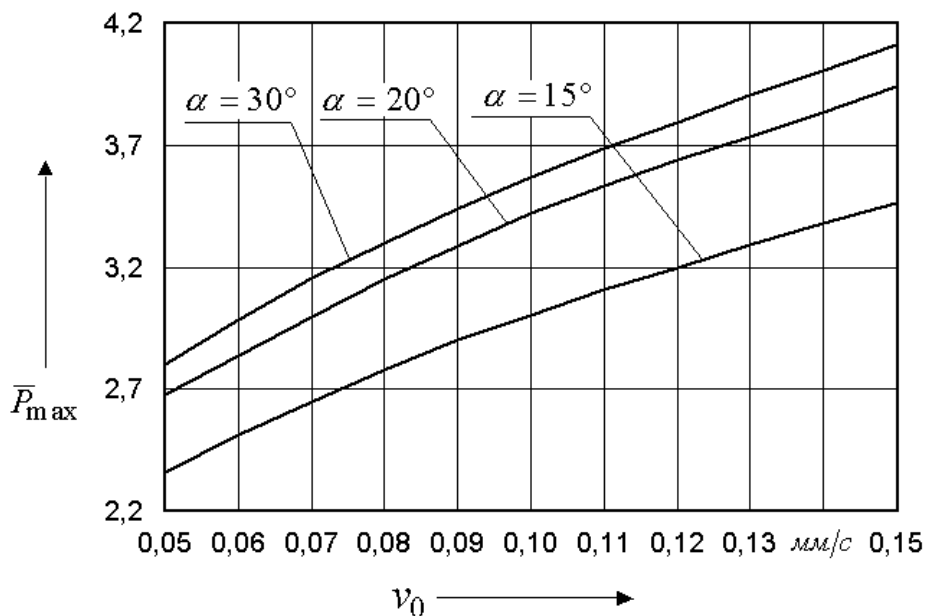


Рис. 2. Зависимости изменения  $\bar{P}_{\max}$  от  $v_0$

Установлено, что относительная величина силы  $\bar{P}_{\max}$  существенно зависит от скорости перемещения пуансона  $v_0$  и коэффициента вытяжки  $m_{di}$ . С уменьшением коэффициента вытяжки  $m_{di}$  относительная величина относительной силы  $\bar{P}_{\max}$  растет. Относительная величина силы процесса  $\bar{P}_{\max}$  с ростом величины  $v_0$  резко возрастает. Интенсивность роста  $\bar{P}_{\max}$  увеличивается с уменьшением угла конусности матрицы  $\alpha$ . С ростом коэффициента трения на матрице  $\mu_M$  величина относительной силы  $\bar{P}_{\max}$  возрастает.

Установлено влияние анизотропии механических свойств на напряженное и деформированное состояние заготовки и силовые режимы процесса изотермической вытяжки. На рис. 3 приведены зависимости изменения относительной величины  $\bar{P}_{\max}$  от коэффициента нормальной анизотропии  $R$  при фиксированных углах конусности матрицы  $\alpha$ . В расчетах принималось  $m_{di} = 0,8$ ;  $\mu_M = 0,1$ ;  $\bar{R}_{II} = 2$ ;  $s_0 = 1$  мм;  $v_0 = 0,1$  мм/с;  $h_z = 60$  мм (высота цилиндрической части заготовки);  $B = 6,06 \cdot 10^{-6}$  1/с;  $\sigma_* = 38$  МПа;  $n = 2,57$ ;  $m = 1,0$ ;  $\mu = 7,45$  [2, 3].

Анализ графических зависимостей и результатов расчетов показывает, что величина относительной силы  $\bar{P}_{\max}$  уменьшается с ростом коэффициента анизотропии  $R$  и уменьшением угла конусности матрицы  $\alpha$ . Установлено, что увеличение коэффициента анизотропии  $R$  от 0,2 до 2 приводит к уменьшению величины  $\bar{P}_{\max}$  при  $\alpha = 15^\circ$  на 25 %.

Влияние всех исследуемых технологических параметров и анизотропии механических свойств на величину максимального растягивающего напряжения на выходе из очага деформации аналогично относительной величине силы.

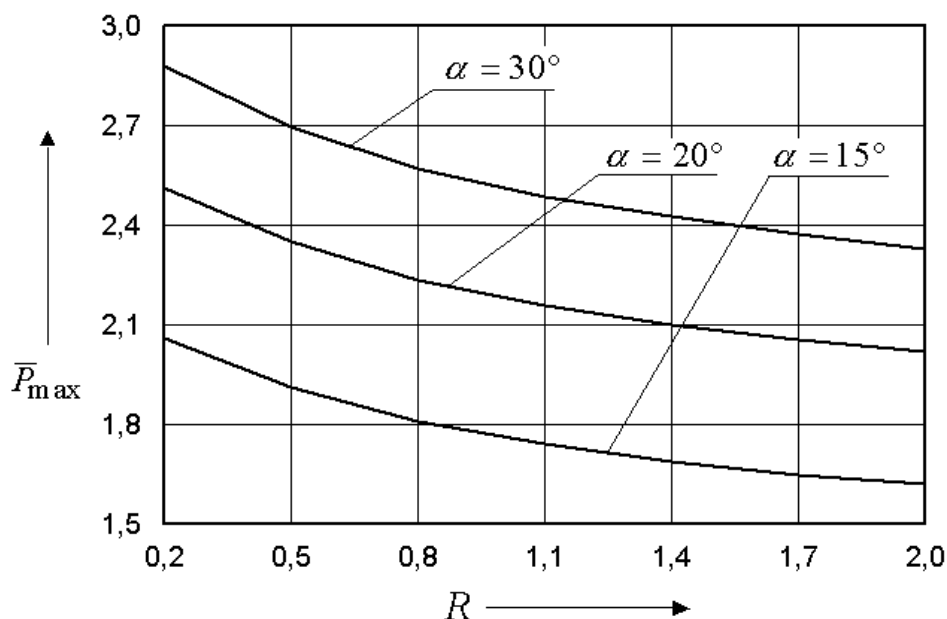


Рис. 3. Зависимости изменения  $\bar{P}_{max}$  от  $R$

Предельные возможности последующих операций вытяжки оценивались по максимальной величине осевого напряжения  $\sigma_x$  в стенке изделия на выходе из очага деформации, которая не должна превышать величины сопротивления материала пластическому деформированию с учетом скоростного упрочнения:

$$\sigma_x \leq \sqrt{\frac{2(R+2)}{3(R+1)}} \sigma_e$$

и допустимой степенью использования ресурса пластичности [10, 11]:

$$\omega \leq 1,$$

где  $R$  – коэффициент нормальной анизотропии.

Предельные возможности деформирования устанавливались путем численных расчетов по этим неравенствам в зависимости от угла конусности матрицы  $\alpha = 10...40^\circ$ , условий трения на инструменте  $\mu_M = 0,05 - 0,2$ . С этой целью разработан алгоритм расчета процесса и программное обеспечение для ЭВМ. Расчеты выполнены для ряда материалов, поведение которых описывается кинетической и энергетической теориями ползучести и повреждаемости. Механические свойства исследуемых материалов приведены в работах [2, 3].

На рис. 4 представлены зависимости предельных коэффициентов вытяжки  $m_{d_{inp}}$  в зависимости от угла конусности матрицы  $\alpha$  для латуни Л63, поведение которой описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости. Расчеты выполнены при  $\mu_M = 0,1$ ;  $\bar{R}_\Pi = 2$ ;  $s_0 = 1$  мм;  $R = 0,85$ ;  $h_z = 60$  мм;  $\bar{R}_\Pi = R_\Pi / s_0$ ;  $h_z$  – высота заготовки;  $R_\Pi$  – радиус закругления пуансона.

Анализ графических зависимостей и результатов расчета показывает, что с увеличением угла конусности матрицы  $\alpha$  и скорости перемещения пуансона  $v_0$  предельный коэффициент вытяжки  $m_{d_{inp}}$  уменьшается (рис. 2). Установлено, что изменение условий трения на контактной поверхности матрицы не оказывает существенного влияния на предельный коэффициент вытяжки. Показано, что предельные возможности формоизменения ограничиваются степенью использования ресурса пластичности ( $\omega = 1$ ) для исследованных материалов.

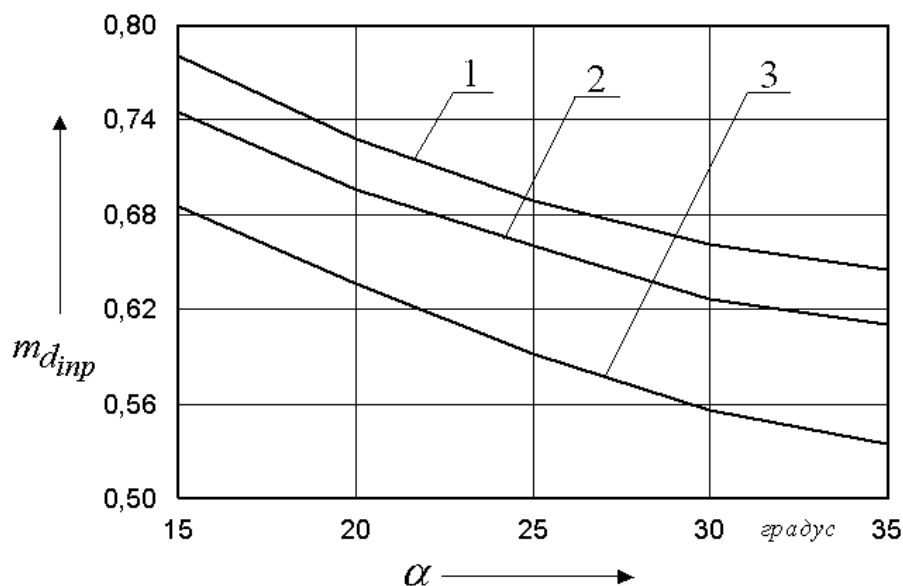


Рис. 4. Зависимости изменения  $m_{d_{inp}}$  от  $\alpha$  :

кривая 1 –  $v_0 = 0,15$  мм/с ; кривая 2 –  $v_0 = 0,1$  мм/с ; кривая 3 –  $v_0 = 0,05$  мм/с

Установлено, что коэффициент нормальной анизотропии  $R$  не оказывает существенно влияние на величину предельного коэффициента вытяжки  $m_{d_{inp}}$ . Изменение  $R$  от 0,2 до 2 приводит к уменьшению  $m_{d_{inp}}$  приблизительно на 10 %.

Отдельные результаты теоретических исследований предельных возможностей формоизменения для ряда материалов, поведение которых подчиняется кинетической теории ползучести и повреждаемости, и температуры обработки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Величины предельных коэффициентов вытяжки  $m_{d_{inp}}$

Материал	$m_{d_{inp}}$
Сплав ВТ14 ( $T = 950$ °C)	0,705
Сплав ВТ14 ( $T = 1000$ °C)	0,74
Сплав АМг6 ( $T = 420$ °C)	0,805
Сплав ВТ6С ( $T = 930$ °C)	0,735

### ВЫВОДЫ

Анализ результатов расчетов показывает, что предельные возможности формоизменения в режиме ползучего течения материала, поведение которого подчиняется кинетической теории ползучести и повреждаемости, не зависят от скорости перемещения пуансона  $v_0$  при фиксированном угле конусности матрицы  $\alpha$ .

Таким образом, при анализе силовых режимов и предельных возможностей деформирования на последующих операциях изотермической вытяжки осесимметричных деталей в конической матрице необходимо учитывать начальную анизотропию механических свойств материала заготовки, как и в процессах холодной штамповки.

Приведенные выше соотношения могут быть использованы для оценки напряженного и деформированного состояний, силовых режимов и предельных возможностей деформирования на последующих операциях изотермической вытяжки в конических матрицах осесимметричных деталей из трансверсально-изотропного материала в режиме вязкого течения материала.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания №2014/227 на выполнение научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Российской Федерации на 2014–2020 годы и гранта РФФИ № 14-08-00066 а.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / под общ. ред. С. С. Яковлева; ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2010. – 732 с.*
2. *Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С. П. Яковлев, В. Н. Чудин, С. С. Яковлев, Я. А. Соболев. – М. : Машиностроение, 2004. – 427 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. *Яковлев С. П. Обработка давлением анизотропных материалов / С. П. Яковлев, С. С. Яковлев, В. А. Андрейченко – Кишинев : Квант. 1997. – 331 с.*
5. *Малинин Н. Н. Ползучесть в обработке металлов / Н. Н. Малинин – М. : Машиностроение, 1986. – 216 с.*
6. *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.*
7. *Попов Е. А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е. А. Попов, В. Г. Ковалев, И. Н. Шубин – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 480 с.*
8. *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.*
9. *Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.*
10. *Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров – Екатеринбург : Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. – 836 с.*

### REFERENCES

1. *Kovka i shtampovka: spravochnik: v 4 t. T. 4. Listovaja shtampovka / pod obshh. red. S. S. Jakovleva; red. sovet: E.I. Semenov (pred.) i dr. 2-e izd., pererab. i dop. – M. : Mashinostroenie, 2010. – 732 s.*
2. *Izotermicheskoe deformirovanie vysokoprochnyh anizotropnyh metallov / S. P. Jakovlev, V. N. Chudin, S. S. Jakovlev, Ja. A. Sobolev. – M. : Mashinostroenie, 2004. – 427 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. *Jakovlev S. P. Obrabotka davleniem anizotropnyh materialov / S. P. Jakovlev, S. S. Jakovlev, V. A. Andrejchenko – Kishinev : Kvant. 1997. – 331 s.*
5. *Malinin N. N. Polzuchest' v obrabotke metallov / N. N. Malinin – M. : Mashinostroenie, 1986. – 216 s.*
6. *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.*
7. *Popov E. A. Tehnologija i avtomatizacija listovoj shtampovki / E. A. Popov, V. G. Kovalev, I. N. Shubin – M. : Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2000. – 480 s.*
8. *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.*
9. *Bogatov A. A. Mehanicheskie svojstva i modeli razrushenija metallov. Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2002. 329 s.*
10. *Kolmogorov V. L. Mehanika obrabotki metallov davleniem / V. L. Kolmogorov – Ekaterinburg : Ural'skij gosudarstvennyj tehničeskij universitet (UPI), 2001. – 836 s.*

Яковлев С. С. – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО ТулГУ

Пасынков А. А. – канд. техн. наук, доц. ФГБОУ ВПО ТулГУ

Нуждин Г. А. – орган по сертификации систем качества ООО«Консерсиум»

ФГБОУ ВПО ТулГУ – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тульский государственный университет», г. Тула, РФ;

ООО «Консерсиум» – Общество с Ограниченной Ответственностью «Консерсиум», г. Москва, РФ.

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

Статья поступила в редакцию 18.03.2015 г.