

УДК 621.983; 539.374

Яковлев С. С.  
Малышев А. Н.  
Бессмертная Ю. В.

## ВЫТЯЖКА КОРОБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ С МАЛЫМИ УГЛОВЫМИ РАДИУСАМИ

В различных отраслях машиностроения широкое распространение нашли полые изделия различной конфигурации (цилиндрического, квадратного и прямоугольного поперечных сечений), изготавливаемые методами глубокой вытяжки. Однооперационной вытяжкой изготавливают низкие ( $H_{np}/B \leq 0,6-0,8$ ) и многооперационной вытяжкой высокие ( $H_{np}/B > 0,6-0,8$ ) коробчатые детали, где  $H_{np}$  и  $B$  – высота детали с учетом припуска на обрезку и ширина (длина) коробчатой детали прямоугольного поперечного сечения соответственно. Формы и размеры исходных заготовок и переходов устанавливают по разверткам и рекомендуемым степеням вытяжки в соответствии со справочной литературой. В зависимости от величин угловых радиусов изделий вытяжка коробчатых деталей прямоугольного поперечного сечения может осуществляться по разным схемам [1, 2].

Листовой материал, подвергаемый процессам деформирования, как правило, обладает анизотропией механических свойств, которая может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов глубокой вытяжки [3–6].

Цель работы – изучение математической модели операции вытяжки коробчатых деталей с малыми угловыми радиусами.

В технологии вытяжки коробчатых деталей с малыми угловыми радиусами  $r_{y_{2л}}/(2A_1 - h) \leq 0,17$  ( $A_1$  и  $h$  – ширина, и высота детали) используют заготовки упрощенной формы – прямоугольник со срезанными углами. При этом угловые части заготовки рассматривают по коэффициенту угловой вытяжки, а прямые – по разверткам сторон детали [1, 2].

Расчеты силовых параметров рассматриваемой операции деформирования будем вести исходя из экстремальной верхнеграничной теоремы, в соответствии с которой справедливо неравенство [7]:

$$PV_n \leq W_{вн} + W_p + W_{тр} , \quad (1)$$

где  $PV_n$  – мощность внешних сил  $P$  при скорости перемещения пуансона  $V_n$ ;  $W_{вн}$ ,  $W_p$ ,  $W_{тр}$  – соответственно мощность сил деформаций, мощность на линиях разрыва скоростей и мощность трения на поверхностях контакта материала с инструментом.

Материал заготовки примем трансверсально-изотропным, механическое состояние которого определяется функцией [3–6]:

$$\sigma_i = B(\varepsilon_i)^m , \quad (2)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $B$ ,  $m$  – экспериментальные константы материалов.

Расчетная схема операции показана на рис. 1. Принятое разрывное поле скоростей состоит из угловых зон деформаций и жестких зон у прямых сторон внутреннего контура фланца. Линии разрыва – прямые, соединяющие точки сопряжения угловых и прямых участков внутреннего контура фланца с угловыми точками его внешнего контура.

В зонах деформаций перемещения радиальные, а в жестких – по нормальям к контуру матрицы. Все линейные и угловые размеры заготовки и поля известны из эмпирического расчета заготовки. Для удобства последующих расчетов уравнение внешнего углового контура заготовки  $x + y = A - a = B - b$  запишем в полярных координатах:

$$r_0 = \frac{A - a}{\sin \varphi + \cos \varphi}. \quad (3)$$

Здесь  $A, a$  – геометрические размеры заготовки;  $0 \leq \pi \leq \pi/2$  – угловые координаты точек внешнего углового контура фланца. Интенсивность скорости деформации  $\xi_i$  и интенсивность деформации  $\varepsilon_i$  в зонах деформаций вычисляются так:

$$\xi_i = \chi V_n r_n^{R/(R+1)} r^{-(1+2R)/(1+R)}; \quad \varepsilon_i = \chi \ln \frac{r}{r_n}, \quad (4)$$

при радиальной скорости точек

$$V_r = V_n \left( \frac{r_n}{r} \right)^{R/(1+R)}, \quad (5)$$

где  $\chi = \left[ \frac{2(2+R)}{3(1+R)} \right]^{1/2}$ ;  $R$  – коэффициент нормальной анизотропии.

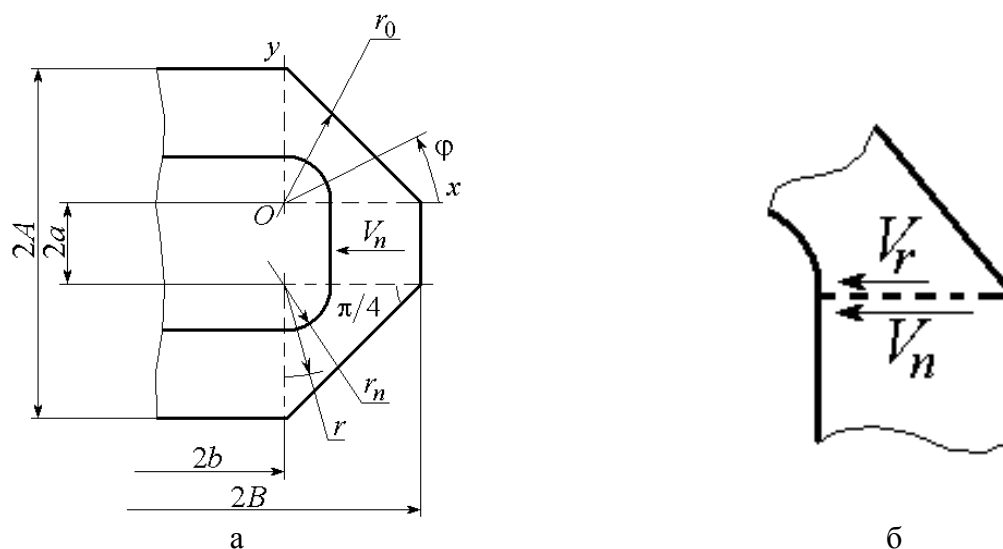


Рис. 1. Вытяжка прямоугольной коробки с малыми угловыми радиусами: а – заготовка и поле скоростей; б – план скоростей на линии разрыва

Распределение толщины фланца в угловых зонах будем определять, как и ранее, выражением:

$$s = s_0 \left( \frac{r}{r_n} \right)^{1/(1+R)}. \quad (6)$$

Величину интенсивности напряжения определяем по уравнению упрочнения материала (2) при использовании соотношений (4).

Мощность внутренних сил будет записана в виде:

$$W_{вн} = 4B \chi^{1+m} s_0 V_n r_n^{\frac{R-1}{1+R}} \times \int_0^{\pi/2} \left[ \int_{r_n}^{r_0} r^{1-\frac{2R}{1+R}} \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^m dr \right] d\varphi. \quad (7)$$

После преобразований и интегрирования по координате  $r$  получим окончательное выражение для определения мощности внутренних сил:

$$W_{\text{вн}} = 4B \chi^{1+m} s_0 V_n \frac{R}{r_n^{1+R}}^{-m+p} \times \int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{1}{p} \left[ \left( \frac{A-a}{(\sin \varphi + \cos \varphi) r_n} \right)^p - 1 \right] - \frac{m}{p-1} \left[ \left( \frac{A-a}{(\sin \varphi + \cos \varphi) r_n} \right)^{p-1} - 1 \right] \right\} d\varphi, \quad (8)$$

где  $p = 2 + m - \frac{2R}{1+R}$ .

Для окончательного решения в интеграл (8) необходимо внести выражение (3) и произвести численное интегрирование по  $\varphi$ .

На линиях разрыва векторы скорости по обе стороны от нее  $V_r$  и  $V_n$  параллельные и совпадают с линией разрыва. Нормальная скорость отсутствует. Скачок скорости считаем постоянным по всей линии, т. е.:

$$V_p = V_n \left( 1 - \left( \frac{r_n}{r_0} \right)^{R/(1+R)} \right). \quad (9)$$

Величины интенсивности скорости деформации и деформации определяются соотношениями (4). Величине касательного напряжения здесь соответствует выражение, следующее из приближенного условия текучести трансверсально-анизотропного материала. В данном случае:

$$\tau_p = B \eta \chi^m \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^m. \quad (10)$$

Толщину заготовки на линиях разрыва примем постоянной, равной толщине края фланца, т. е.:

$$s = s_0 \left( \frac{r_0}{r_n} \right)^{1/(1+R)}. \quad (11)$$

В этом случае, учитывая выражения (9) – (11), мощность на линиях разрыва получит вид соотношения:

$$W_p = 8B \eta \chi^m s_0 V_n r_n^{-1/(1+R)} \left[ 1 - \left( \frac{r_n}{r_0} \right)^{R/(1+R)} \right] \times (r_0)^{1/(1+R)} \int_{r_n}^{r_0} \left( \ln \frac{r}{r_n} \right)^m dr. \quad (12)$$

Используем приближенное разложение подынтегральной функции. Учитываем, используя уравнение (3) при  $\varphi = 0$ , что  $r = A - a$ , и проинтегрируя данное выражение, получим:

$$W_p = 8B \eta \chi^m s_0 V_n r_n^{p-m+\frac{mR-1}{1+R}} (A-a) \times \left[ 1 - \left( \frac{r_n}{A-a} \right)^{R/(1+R)} \right] \left\{ \frac{1}{p} \left[ \left( \frac{A-a}{r_n} \right)^p - 1 \right] - \frac{m}{p-1} \left[ \left( \frac{A-a}{r_n} \right)^{p-1} - 1 \right] \right\}, \quad (13)$$

где  $p = 1 + m$ .

Перейдем к расчету мощности трения фланца заготовки на матрице и прижмем. Считаем, что  $\tau_k = \mu q$  – контактное касательное напряжение трения при скорости перемещения фланца в зонах деформаций  $V_r$  и в жестких зонах  $V_n$ .

Мощность сил трения  $W_{mp}$  может быть вычислена по выражению:

$$W_{mp} = 8 \mu q V_n \left\{ r_n^{R/(1+R)} \int_0^{\pi/2} \int_{r_n}^{r_0} r^{1/(1+R)} dr d\varphi + \frac{1}{2} [a(B-b-r_n) + b(A-a-r_n)] \right\}.$$

После внутреннего интегрирования получим:

$$W_{mp} = 8 \mu q V_n \left\{ \frac{(1+R)r_n^2}{2+R} \int_0^{\pi/2} \left[ \left( \frac{A-a}{(\sin \varphi + \cos \varphi)r_n} \right)^{\frac{2+R}{1+R}} - 1 \right] d\varphi + \frac{1}{2} [a(B-b-r_n) + b(A-a-r_n)] \right\}. \quad (14)$$

Дальнейшее интегрирование по координате  $\varphi$  производится численно.

Приведенные выше соотношения для мощностей (8), (13), (14) необходимо внести в энергетическое неравенство (1) и получить оценку максимальной силы вытяжки.

Силовые режимы операции вытяжки коробчатых деталей с малыми угловыми радиусами из прямоугольной листовой заготовки со срезанными углами исследовались в зависимости от анизотропии механических свойств листовой заготовки, условий трения на контактной поверхности рабочего инструмента и заготовки и давления прижима  $q$ .

На рис. 2 и 3 приведены графические зависимости изменения относительной максимальной величины силы  $\bar{P}$  операции вытяжки от величины давления прижима  $q$  и коэффициента трения на контактной поверхности рабочего инструмента и заготовки  $\mu$  для алюминиевого сплава АМг6М, латуни Л63 и стали 08кп. Расчеты выполнены при  $r_0 = 550$  мм;  $A = 550$  мм;  $B = 600$  мм;  $a = 150$  мм;  $b = 250$  мм;  $r_n = 100$  мм;  $s_0 = 1$  мм;  $h = 140$  мм. Величина давления прижима  $q$  назначалась в соответствии с рекомендациями [2].

Анализ результатов расчетов и графических зависимостей, приведенных на рис. 2 и 3, показывает, что с увеличением коэффициента трения на контактной поверхности рабочего инструмента и заготовки  $\mu$ , величины давления прижима  $q$  относительная величина максимальной силы операции вытяжки  $\bar{P}$  возрастает.

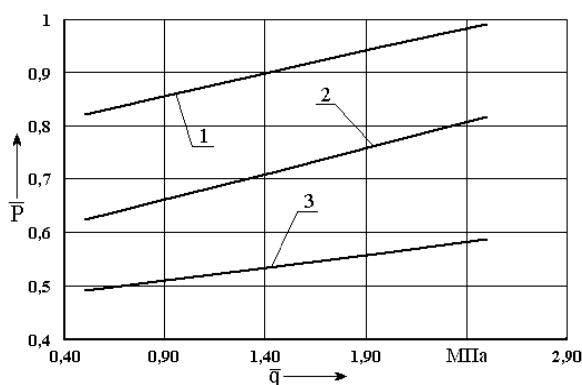


Рис. 2. Зависимости изменения  $\bar{P}$  от  $q$  ( $\mu = 0,1$ ):

кривая 1 – латунь Л63; кривая 2 – алюминиевый сплав АМг6М; кривая 3 – сталь 08кп

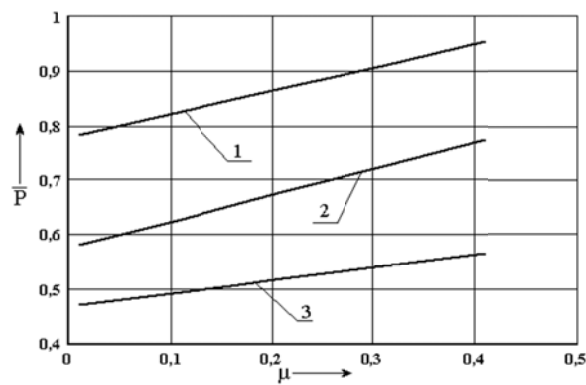


Рис. 3. Зависимости изменения  $\bar{P}$  от  $\mu$  ( $q = 1$  МПа):

кривая 1 – латунь Л63; кривая 2 – алюминиевый сплав АМг6М; кривая 3 – сталь 08кп

## ВЫВОДЫ

Рост величины давления прижима  $q$  от 0,4 до 2,0 сопровождается увеличением относительной величины максимальной силы операции вытяжки  $\bar{P}$  на 35 % при коэффициенте трения на контактной поверхности рабочего инструмента и заготовки  $\mu = 0,1$ . Уменьшение коэффициента трения на контактной поверхности рабочего инструмента и заготовки  $\mu$  с 0,4 до 0,05 приводит к падению относительной величины максимальной силы операции вытяжки  $\bar{P}$  на 40 %.

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. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке* / В. П. Романовский – Л. : Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. *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.
3. Яковлев С. П. *Обработка давлением анизотропных материалов* / С. П. Яковлев, С. С. Яковлев, В. А. Андрейченко – Кишинев : Квант, 1997. – 331 с.
4. Яковлев С. С. *Теория и технология штамповки анизотропных материалов* / С. С. Яковлев, В. Д. Кухарь, В. И. Трезубов; под ред. С. С. Яковлева. – М. : Машиностроение, 2012. – 400 с.
5. Арышенский Ю. М. *Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов* / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников – М. : Metallurgia, 1990. – 304 с.
6. Гречников Ф. В. *Деформирование анизотропных материалов* / Ф. В. Гречников – М. : Машиностроение, 1998. – 446 с.
7. *Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов* / В.А. Голенков [и др.]; под ред. В. А. Голенкова, С. П. Яковлева. – М. : Машиностроение, 2009. – 442 с.

#### REFERENCES

1. Romanovskij V. P. *Spravochnik po holodnoj shtampovke* / V. P. Romanovskij – L. : Mashinostroenie, 1979. – 520 s.
2. *Kovka i shtampovka: spravochnik: v 4 t. t. 4. Listovaja shtampovka* / pod obshh. red. S. S. Jakovleva; red. совет: E. I. Semenov (pred.) [i dr.], 2-e izd., pererab. i dop. – M. : Mashinostroenie, 2010. – 732 s.
3. Jakovlev S. P. *Obrabotka davleniem anizotropnyh materialov* / S. P. Jakovlev, S. S. Jakovlev, V. A. Andrejchenko – Kishinev : Kvant, 1997. – 331 s.
4. 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.
5. Aryshenskij Ju. M. *Teorija i raschety plasticheskogo formoizmenenija anizotropnyh materialov* / Ju. M. Aryshenskij, F. V. Grechnikov – M. : Metallurgija, 1990. – 304 s.
6. Grechnikov F. V. *Deformirovanie anizotropnyh materialov* / F. V. Grechnikov – M. : Mashinostroenie, 1998. – 446 s.
7. *Teorija obrabotki metallov davleniem: Uchebnik dlja vuzov* / V.A. Golenkov [i dr.]; pod red. V. A. Golenkova, S. P. Jakovleva. – M. : Mashinostroenie, 2009. – 442 s.

Яковлев С. С. – д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО ТулГУ  
Мальшев А. Н. – канд. техн. наук, доц. ФГБОУ ВПО ТулГУ  
Бессмертная Ю. В. – канд. техн. наук, ассистент ФГБОУ ВПО ТулГУ

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

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