

УДК 621.983; 539.374

Бессмертная Ю. В.
Платонов В. И.**ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПРОЦЕССА ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ
ВЫТЯЖКИ НИЗКИХ КОРОБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ С МАЛЫМИ РАДИУСАМИ
ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ ЗАГОТОВОК**

Вытяжка изделий коробчатых форм является одним из сложных процессов листовой штамповки. В связи со сложным характером течения деформируемого материала технологические расчеты форм заготовок и переходов вытяжки, кинематики, напряжений, сил затруднительны. В производстве при проектировании технологических процессов обычно руководствуются данными и рекомендациями технологической практики. Далее рассмотрим процессы вытяжки низких изделий коробчатых форм. Они штампуются, как правило, за одну операцию. Прямоугольные коробчатые детали вытягивают из заготовок, форма которых зависит от относительных размеров деталей, в том числе от величины угловых радиусов. Как сказано ранее, в зависимости от этого могут быть использованы овальные заготовки с прямыми сторонами и прямоугольные со срезанными угловыми элементами.

В технологии вытяжки коробчатых деталей с малыми угловыми радиусами $\frac{r_{\text{угл}}}{2a-h} \leq 0,17$ используют заготовки упрощенной формы – прямоугольник со срезанными углами. При этом угловые части заготовки рассматривают по коэффициенту угловой вытяжки, а прямые – по разверткам сторон детали [1–3].

Цель работы – определение оптимальных технологических параметров изотермической вытяжки низких коробчатых деталей с малыми радиусами для минимизации энергосиловых параметров рассматриваемого процесса.

Расчетная схема операции показана на рис. 1. Принятое разрывное поле скоростей состоит из жестких зон у прямых сторон внутреннего контура фланца и угловых зон деформаций. 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. Из эмпирического расчета заготовки известны все линейные и угловые размеры заготовки и поля. Для удобства последующих расчетов уравнение внешнего углового контура заготовки $x + y = A - a = B - b$ запишем в полярных координатах

$$r_0 = \frac{A - a}{\sin \varphi + \cos \varphi}. \quad (1)$$

Здесь A, a – геометрические размеры заготовки; $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ – угловые координаты точек внешнего углового контура фланца. Эквивалентные скорости деформаций и эквивалентные деформации в зонах деформаций равны

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

при радиальной скорости точек

$$V_\rho = V_n \left(\frac{r_n}{r} \right)^{R/(1+R)}. \quad (3)$$

В угловых зонах распределение толщины фланца вычисляется следующим образом

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{r}{r_n} \right)^{\frac{1}{1+R}}. \quad (4)$$

Мощность внутренних сил будет записана в виде

$$W_{\text{вн}} = 4k \chi^{1+m+n} \delta_0 V_n^{1+n} r_n^{\frac{(1+n)R-1}{1+R}} \times \int_0^{\pi/2} \left[\int_{r_n}^{r_0} r^{1+\frac{1-(1+n)(1+2R)}{1+R}} \left(\ln \frac{r}{r_n} \right)^m dr \right] d\varphi, \quad (5)$$

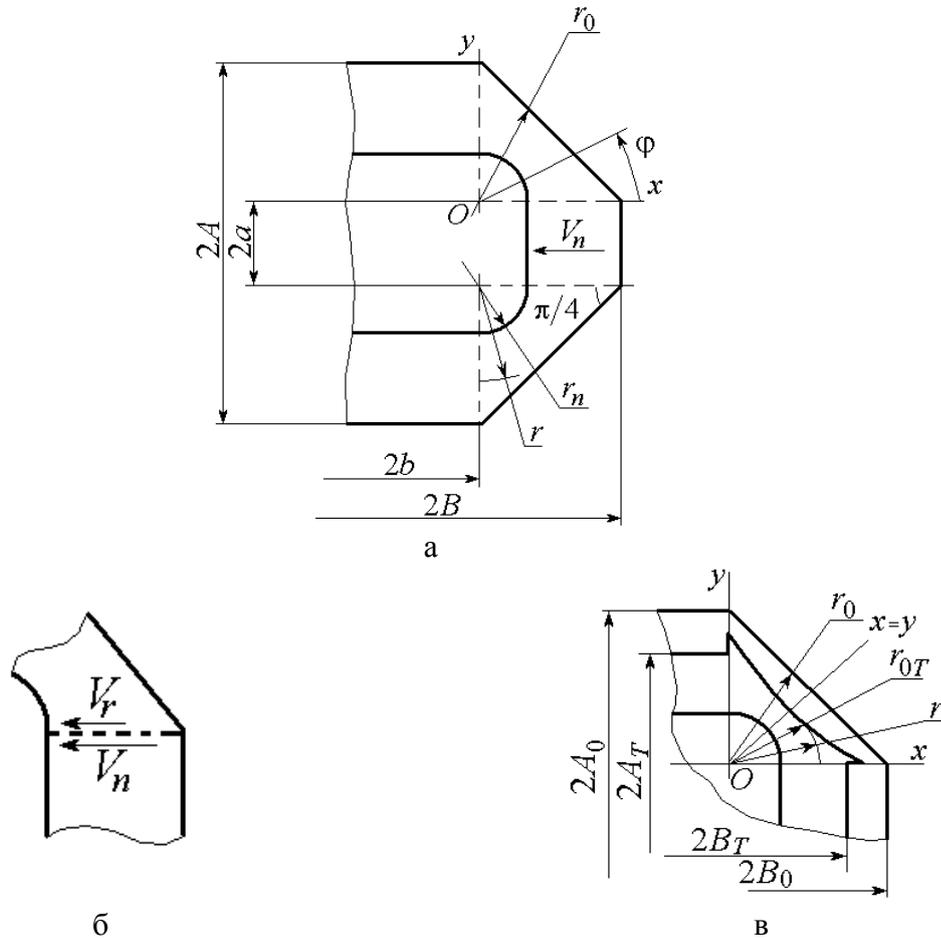


Рис. 1. Вытяжка прямоугольной коробки с малыми угловыми радиусами: а – заготовка и поле скоростей; б – план скоростей на линии разрыва; в – схема перемещения фланца

Заменим приближенной функцией подинтегральное выражение внутреннего интеграла (4)

$$\left(\frac{1}{r_n} \right)^m \left(1 - m \frac{r_n}{r} \right) r^{1+m \frac{1-(1+n)(1+2R)}{1+R}}$$

и интегрируем по координате r . Получим, что

$$W_{\text{вн}} = 4k \chi^{1+m+n} \delta_0 V_n^{1+n} r_n^{\frac{(1+n)R}{1+R} - m+p} \times \int_0^{\pi/2} \left\{ \frac{1}{p} \left[\left(\frac{A-a}{(\sin \varphi + \cos \varphi) r_n} \right)^p - 1 \right] - \frac{m}{p-1} \left[\left(\frac{A-a}{(\sin \varphi + \cos \varphi) r_n} \right)^{p-1} - 1 \right] \right\} d\varphi, \quad (6)$$

$$p = 2 + m + \frac{1 - (1+n)(1+2R)}{1+R}.$$

Для окончательного решения в интеграл (6) необходимо внести выражение (1) и произвести численное интегрирование по φ .

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

$$V_p = V_n \left(1 - \left(\frac{r_n}{r_0} \right)^{\frac{R}{1+R}} \right). \quad (7)$$

Величине касательного напряжения здесь соответствует выражение, следующее из приближенного условия текучести трансверсально-анизотропного материала. В данном случае

$$\tau_p = k \eta \chi^{m+n} V_n^n r_n^{\frac{nR}{1+R}} r^{-\frac{n(1+2R)}{1+R}} \left(\ln \frac{r}{r_n} \right)^m. \quad (8)$$

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

$$\delta = \delta_0 \left(\frac{r_0}{r_n} \right)^{\frac{1}{1+R}}. \quad (9)$$

Таким образом, принимая во внимание выражения (7)–(9), мощность на линиях разрыва запишется в виде

$$W_p = 8k \eta \chi^{m+n} \delta_0 V_n^{1+n} r_n^{\frac{nR-1}{1+R}} \left[1 - \left(\frac{r_n}{r_0} \right)^{\frac{R}{1+R}} \right] \times (r_0)^{\frac{1}{1+R}} \int_{r_n}^{r_0} r^{-\frac{n(1+2R)}{1+R}} \left(\ln \frac{r}{r_n} \right)^m dr. \quad (10)$$

Применяем, как и при выводе соотношения (2), приближенное разложение подинтегральной функции. Учитываем, используя уравнение (1) при $\varphi = 0$, что

$$r = A - a,$$

и проинтегрируем данное выражение. Получим

$$W_p = 8k \eta \chi^{m+n} \delta_0 V_n r_n^{\frac{p-m+R-1}{1+R}} (A-a) \times \left[1 - \left(\frac{r_n}{A-a} \right)^{\frac{R}{1+R}} \right] \left\{ \frac{1}{\rho} \left[\left(\frac{A-a}{r_n} \right)^p - 1 \right] - \frac{m}{p-1} \left[\left(\frac{A-a}{r_n} \right)^{p-1} - 1 \right] \right\}, \quad (11)$$

$$\text{где } p = 1 + m - \frac{n(1+2R)}{1+R}.$$

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_ρ и в жестких зонах – V_n . Мощность сил трения в этой связи

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

После внутреннего интегрирования получим

$$W_{mp} = 8 \mu q V_n \left\{ \frac{(1+R)r_n^2}{2+R} \int_0^{\pi/2} \left[\left(\frac{A-a}{(\sin \varphi + \cos \varphi) r_n} \right)^{\frac{2+R}{1+R}} - 1 \right] d\varphi + \frac{1}{2} [a(B-b-r_n) + b(A-a-r_n)] \right\}. \quad (12)$$

Дальнейшее интегрирование по координате φ производится численно.

Для того, чтобы выполнить оценку максимальной силы вытяжки, необходимо полученные соотношения для мощностей (6), (11), (12) внести в энергетическое неравенство $PV_n \leq W_{\text{вн}} + W_p + W_{\text{тр}}$.

Силовые режимы процесса изотермической вытяжки низких коробчатых деталей с малыми угловыми радиусами из прямоугольной листовой заготовки со срезанными углами исследовались в зависимости от анизотропии механических свойств листовой заготовки, скорости перемещения пуансона V_n , условий трения на контактной поверхности рабочего инструмента и заготовки и давления прижима q на силовые режимы процесса.

На рис. 2 приведены графические зависимости изменения относительной максимальной величины силы $\bar{P} = P/(F\sigma_*)$ процесса изотермической вытяжки от скорости перемещения пуансона V_n , коэффициента трения на контактной поверхности рабочего инструмента и заготовки μ , давления прижима q для алюминиевого сплава АМг6 при температурах обработки $T = 450^\circ\text{C}$ и $T = 530^\circ\text{C}$, а также титанового сплава ВТ6 при $T = 930^\circ\text{C}$, где $F = 4(a + b + \pi r_n / 2)\delta_0$. Расчеты выполнены при $B = 60$ мм; $A = 35$ мм; $a = 15$ мм; $b = 40$ мм; $r_n = 8$ мм; $\delta_0 = 1$ мм; $\sigma_* = 50$ МПа. Величина давления прижима q назначалась в соответствии с рекомендациями [4].

По результатам расчетов и графических зависимостей, приведенных на рис. 2, можно сделать вывод, что величина максимальной силы процесса вытяжки \bar{P} возрастает с увеличением скорости перемещения пуансона V_n , коэффициента трения на контактной поверхности рабочего инструмента и заготовки μ , давления прижима q относительная.

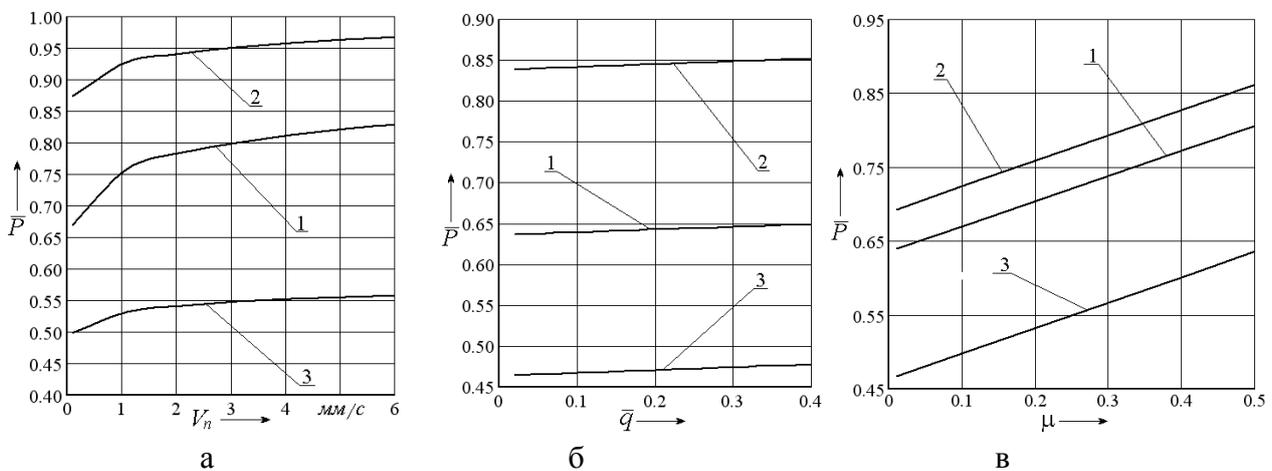


Рис. 2. Зависимости изменения \bar{P} от V_n (а), \bar{q} (б) и μ (в):

кривая 1 – сплав ВТ6 ($T = 930^\circ\text{C}$); кривая 2 – сплав АМг6 ($T = 450^\circ\text{C}$);
кривая 3- сплав АМг6 ($T = 530^\circ\text{C}$)

ВЫВОДЫ

Разработаны математические модели изотермической вытяжки прямоугольных коробчатых деталей с малым относительным угловым радиусом, которые вытягивают из заготовок со скошенными кромками. Получены основные уравнения и соотношения, необходимые для анализа силовых режимов изотермической вытяжки прямоугольных коробчатых деталей из анизотропных высокопрочных листовых материалов. Предложен

кинематический расчет сил на базе экстремальной верхнеграничной теоремы пластичности. Установлено влияние скорости перемещения пуансона, анизотропии механических свойств листового материала, технологических параметров на силовые режимы изотермической вытяжки прямоугольных коробчатых деталей из анизотропных высокопрочных листовых материалов.

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 грантов РФФИ № 16-38-00082 мол_а, № 14-08-00066 а.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайнтрауб Д. А. *Технология глубокой вытяжки прямоугольных коробок* / Д. А. Вайнтрауб. – ЛДНТП, 1957. – 98 с.
2. Зубцов М. Е. *Листовая штамповка* / М. Е. Зубцов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 432 с.
3. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке* / В. П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
4. *Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов* / С. П. Яковлев, В. Н. Чудин, С. С. Яковлев, Я. А. Соболев. – М.: Машиностроение-1, Изд-во ТулГУ, 2004. – 427 с.
5. Ашкенази Е. К. *Анизотропия машиностроительных материалов* / Е. К. Ашкенази. – Л.: Машиностроение, 1969. – 112 с.

REFERENCES

1. Vajntraub D. A. *Tehnologija glubokoj vytjazhki prjamougol'nyh korobok* / D. A. Vajntraub. – LDNTP, 1957. – 98 s.
2. Zubcov M. E. *Listovaja shtampovka* / M. E. Zubcov. – L.: Mashinostroenie, 1980. – 432 s.
3. Romanovskij V. P. *Spravochnik po holodnoj shtampovke* / V. P. Romanovskic. – L.: Mashinostroenie, 1979. – 520 s.
4. *Izotermicheskoe deformirovanie vysokoprochnyh anizotropnyh metallov* / S. P. Jakovlev, V. N. Chudin, S. S. Jakovlev, Ja. A. Sobolev. – M.: Mashinostroenie-1, Izd-vo TulGU, 2004. – 427 s.
5. Ashkenazi E. K. *Anizotropija mashinostroitel'nyh materialov* / E. K. Ashkenazi. – L.: Mashinostroenie, 1969. – 112 s.

Бессмертная Ю. В. – канд. техн. наук, ассистент ТГУ

Платонов В. И. – канд. техн. наук, доц. ТГУ

ТГУ – Тульский государственный университет, г. Тула, РФ.

E-mail: mpf-tula@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 25.02.2016 г.