

УДК 621 777.4

Л. И. АЛИЕВА

Донбасская государственная машиностроительная академия

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЗАГОТОВОК СПОСОБОМ РАДИАЛЬНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ

В статье рассмотрены разновидности технологических способов холодного выдавливания, направленных на снижение дефектов формы при изготовлении деталей различного типа. Одним из путей повышения качества параметров деформирования является повышение жесткости схем напряженного состояния за счет обеспечения противодействия со стороны рабочей пластической среды. При радиальном выдавливании фланцев материал противодействующей среды деформируется преимущественно истечением в радиальном направлении. Энергетическим методом верхней оценки получены зависимости для определения величины противодействия, необходимого и достаточного для предотвращения дефектов формы выдавливаемого фланца и повышения предельной степени деформации. На основе феноменологической теории деформируемости проведены исследования с целью сопоставления степени расхода ресурса пластичности при изготовлении деталей типа стержня с фланцем из алюминиевого сплава АД1 способом радиального выдавливания с противодействием и без его приложения. Установлено, что при выдавливании с приложением противодействия к кромке фланца степень расхода ресурса пластичности материала заготовки может быть снижена в несколько раз по сравнению со свободным радиальным выдавливанием.

Ключевые слова: выдавливание с противодействием, радиальное выдавливание, детали с фланцем, давление деформирования, ресурс пластичности.

Л. І. АЛІЄВА

Донбаська державна машинобудівна академія

ДЕФОРМУВАННЯ ЗАГОТОВОК СПОСОБОМ РАДИАЛЬНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ З ПРОТИТИСКОМ

У статті розглянуті різновиди технологічних способів холодного видавлювання, спрямованих на зниження дефектів форми при виготовленні деталей різного типу. Одним із шляхів підвищення якості параметрів деформування є підвищення жорсткості схем напруженого стану за рахунок забезпечення протитиску з боку робочого пластичного середовища. При радіальному видавлюванні фланців матеріал середовища протитиску деформується переважно течією в радіальному напрямку. Енергетичним методом верхньої оцінки отримані залежності для визначення величини протитиску, необхідного і достатнього для запобігання дефектам форми фланця, що видавлюється і для підвищення граничного ступеня деформації. На основі феноменологічної теорії деформування проведені дослідження з метою зіставлення ступеня витрати ресурсу пластичності при виготовленні деталей типу стержня з фланцем з алюмінієвого сплаву АД1 способом радіального видавлювання з протитиском і без його застосування. Встановлено, що при видавлюванні з додатком протитиску до крайки фланця ступінь витрати ресурсу пластичності матеріалу заготовки може бути знижена в кілька разів у порівнянні з вільним радіальним видавлюванням.

Ключові слова: видавлювання з протитиском, радіальне видавлювання, деталі з фланцем, тиск деформування, ресурс пластичності.

L. I. ALIEVA

Donbass State Engineering Academy

WORKPIECE DEFORMATION BY RADIAL EXTRUSION TECHNIQUE WITH BACKPRESSURE

This paper is considered different of technological method in cold forging process based on the reduction of defects form to make various types of parts. One of the methods to improve the quality of the deformation parameters, it is to increase the stiffness of the stress state schemes by providing backpressure from the working environment of plastic. In the radial extrusion with flanges, material of backpressure environment is deformed with preferential metal flow in radial direction. The dependence for determining the value of backpressure, necessary and sufficient to prevent defects form in extrusion with flanges and increase the limiting the degree of deformation are considered by upper bound method. On the basis of the deformability phenomenological theory, research in order to compare the degree of plasticity resource consumption is

defined to make parts such as rod flanges from aluminum alloy AD1 by radial extrusion technique with backpressure and without this application. It is considered that radial extrusion with backpressure in the edge flange, consumption degree of workpiece material plasticity resource it can be reduced several times compared to the free radial extrusion.

Keywords: extrusion with backpressure, radial extrusion, part with flange, deformation pressure, plasticity resource

Постановка проблемы

Холодная штамповка металлов выдавливанием широко используется во всех отраслях промышленности. Для изготовления сплошных и полых деталей с фланцами разных толщин и диаметров в большинстве случаев используют процессы радиального выдавливания [1, 2]. К факторам, ограничивающим распространение холодного радиального выдавливания можно отнести наличие высоких удельных усилий, а также неблагоприятную схему напряженного состояния в области экватора фланца, что ограничивает возможности получения фланцев относительно больших размеров [2].

Анализ последних исследований и публикаций

Для повышения предельной степени формоизменения и устранения искажения формы фланца перспективными являются схемы радиального выдавливания с противодавлением, которое может быть создано путем выдавливания в клиновидную или ступенчатую полость твердой рабочей среды или приложения к свободной поверхности фланца гидростатического давления [3]. Способ выдавливания с противодавлением позволяет получить детали правильной геометрической формы и резко расширить диапазон их размеров, а также механических характеристик штампуемых материалов (рис.1).

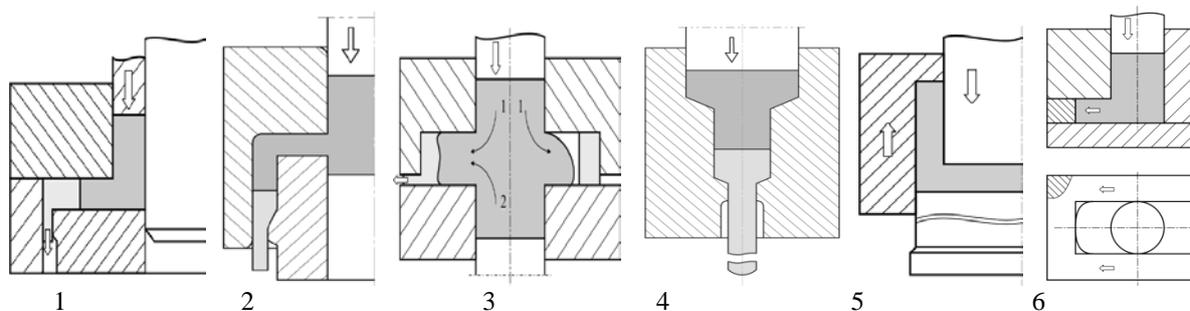


Рис. 1. Способы выдавливания с противодавлением

При радиальном выдавливании наиболее целесообразно исполнение выпускного отверстия для среды противодавления в виде кругового зазора, напоминающего зазор для бокового или торцевого заусенца при объемной штамповке (схемы 1- 3). Важным условием правильного протекания процесса является обеспечение равномерного приложения подпора к выдавливаемому торцу. Для этого вначале радиального выдавливания необходимо за счет последовательно двусторонней подачи сформировать утолщенную кромку фланца, достаточную для обеспечения «герметичности» наполнителя (схема 3).

При продольном прямом (схема 4) или обратном выдавливании, когда выдавливаемый участок перемещается вдоль оси симметрии по прямой линии, противодавление обеспечить относительно легче, так как можно создать при помощи механических буферных устройств.

Полезная роль сил реактивного трения выдавливаемой стенки по инструменту состоит в том, что повышенное трение, действующее в направлении, противоположном истечению металла, может выровнять течение металла и предотвратить появление фестонов на торце стакана или коробки при обратном выдавливании [1] (см. рис.1, схема 5). Аналогичный эффект в выравнивании скоростей истечения и устранении нежелательных дефектов типа «язык» при помощи сил трения наблюдается при боковом выдавливании прямоугольных отрезков (схема 6).

Формулировка цели исследований

Целью данной статьи является оценка силовых параметров и степени использования ресурса пластичности процесса радиального выдавливания фланцев с приложением противодавления.

Изложение основного материала исследования

Задача определения параметров процесса радиального выдавливания с противодавлением решена с привлечением энергетического метода верхней оценки (баланса мощностей) [1, 4].

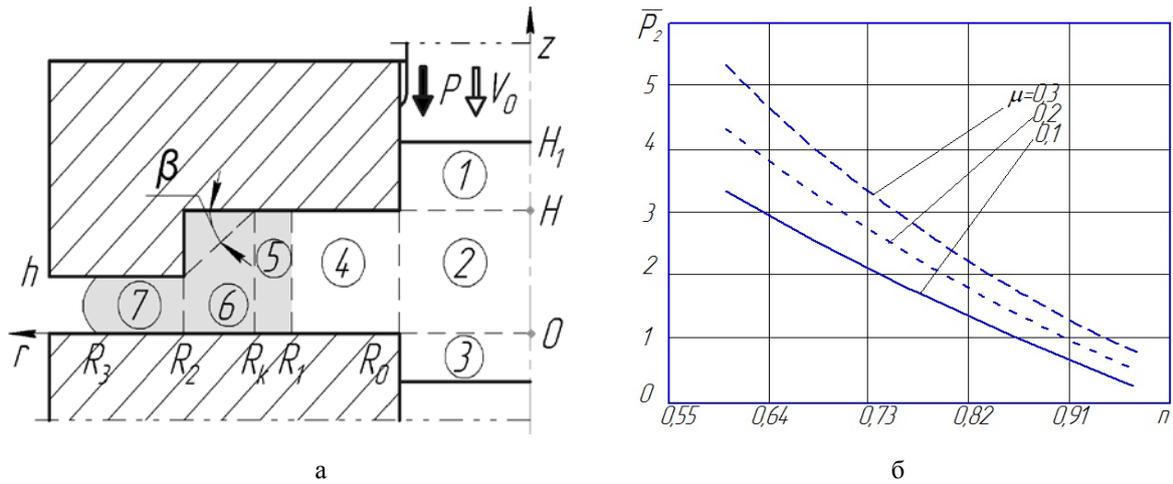


Рис.2. Расчетная схема процесса выдавливания фланца с противодавлением и график зависимости $\bar{p}_2 = f(n)$: $R_3/R_2 = 1.12$; $\beta = \pi/4$.

Исходя из результатов экспериментального анализа деформированного состояния производим разбивку очага деформации на определенные зоны (рис. 2) и рассматриваем одну общую задачу как состоящую из двух областей деформации, в силу того, что материал изделия и среды противодействия не одинаков. При этом, зоны 2,4,5,6,7 относятся к пластическим, а зоны 1, 3 – к жестким, а пластическая зона 2 отделена от жестких зон 1 и 3 плоскостями $Z = 0$ и $Z = H$.

Общее приведенное давление (отнесенное к напряжению текучести соответствующего материала σ_s), для всего процесса будет вычисляться как сумма составляющих приведенных давлений деформирования по двум выделенным областям: $\bar{p}_\Sigma = \bar{p}_1 + \bar{p}_2$.

Для первой области (зоны 1, 2, 3, 4) используем известную формулу для расчета приведенного давления радиального выдавливания [2]:

$$\bar{p}_1 = 1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{R_0}{H} + \frac{H}{R_0} + 2 \cdot \ln \frac{R_1}{R_0} \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \mu \left[\frac{2(H-h)}{R_0} + \frac{R_1 - R_0}{H} \right], \quad (1)$$

Во второй области рассматривается деформирование противодействующей пластичной среды в зонах 5, 6 и 7. Поле скоростей для трапецидального кинематического модуля 6, который лучше описывает картину течения, чем поле параллельного течения, использованное в работе [5], имеет следующий вид:

$$V_z = \frac{-V_5 \cdot R_k \cdot H \cdot \text{tg}(\beta)}{r \cdot F^2(r)} \cdot z; \quad V_r = \frac{-V_5 \cdot R_k \cdot H}{r \cdot F(r)},$$

где скорость входа в зону 6 V_5 равна выходной скорости из зоны 5: $V_5 = -\frac{R_0^2}{2 R_k H} V_0$;

V_0 - скорость перемещения пуансона;

уравнение наклонной границы модуля 6 - $F(r) = H - \frac{H-h}{R_2-R_k} \cdot (r-R_k)$;

$$F'(r) = -\frac{H-h}{R_2-R_k} = -\operatorname{tg}(\beta).$$

Мощность сил среза металла на этой наклонной границе

$$N_s = \frac{2 \cdot \mu_s \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \int_0^{2\pi} d\theta \int_{R_k}^{R_2} \left| \frac{V_5 \cdot R_k \cdot H}{r \cdot F(r)} \right| r dr = \frac{4\pi \cdot \mu_s \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}} V_5 \cdot R_k \cdot H \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\beta)} \ln \left| \frac{H}{h} \right|.$$

Мощность сил среза по боковым поверхностям области 6, то есть на границах с зонами 5 и 7 в случае прямолинейной наклонной границы (у данного трапецидального модуля) вычисляется по одному и тому же выражению

$$N_{s5-6} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_k \int_0^H V_Z \cdot dz = \frac{\pi \cdot \sigma_s \cdot V_5 \cdot R_k \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot H}{\sqrt{3}}.$$

Мощность сил трения по нижней границе модуля 6 равна

$$N_t = \frac{2 \cdot \mu_s \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}} \cdot \int_0^{2\pi} d\theta \int_{R_k}^{R_2} \left| \frac{V_5 \cdot R_k \cdot H}{r \cdot F(r)} \right| r dr = \frac{4\pi \cdot \mu_s \cdot \sigma_s}{\sqrt{3}} V_5 \cdot R_k \cdot H \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(\beta)} \ln \left| \frac{H}{h} \right|.$$

Интеграл мощности сил деформирования в трапецидальном модуле 6 имеет вид

$$N_d = \sigma_s \cdot 2\pi \int_{R_k}^{R_2} r dr \int_0^{F(r)} \dot{\varepsilon}_i dz,$$

где $\dot{\varepsilon}_i$ - интенсивность скоростей деформации.

Ввиду значительной погрешности, возникающей при попытке упрощения подынтегрального выражения методом линеаризации интенсивности скоростей деформации в данной зоне, интеграл необходимо было вычислить численно или с помощью нахождения верхней оценки интеграла:

$$N_{d6} \leq \sigma_s \cdot \sqrt{V_{обл.6} \cdot \iiint_{V_4} \dot{\varepsilon}_i^2 dV_{обл.6}},$$

где $V_{обл.6}$ – объём металла в зоне 6.

$$\begin{aligned} V_{обл.6} &= 2\pi \int_{R_k}^{R_2} r dr \int_0^{F(r)} dz = 2\pi \int_{R_k}^{R_2} r \cdot F(r) dr = 2\pi \int_{R_k}^{R_2} r \cdot [-\operatorname{tg}(\beta) \cdot (r-R_k) + H] dr = \\ &= 2\pi \left[-\operatorname{tg}(\beta) \cdot \frac{r^3}{3} + (H + R_k \cdot \operatorname{tg}(\beta)) \frac{r^2}{2} \right]_{R_k}^{R_2} = \\ &= 2\pi \left[(H + R_k \cdot \operatorname{tg}(\beta)) \cdot \frac{R_2^2 - R_k^2}{2} - \operatorname{tg}(\beta) \cdot \frac{R_2^3 - R_k^3}{2} \right]. \end{aligned}$$

Окончательно, верхнюю оценку мощности сил деформирования можно определить по зависимости:

$$N_{d6} \leq \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot (2\pi \cdot \sigma_s \cdot V_3 \cdot R_k \cdot H) \cdot M, \text{ где}$$

$$M = \left(\begin{aligned} & \left(N \cdot \frac{R_2^2 - R_k^2}{2} - \operatorname{tg}(\beta) \cdot \frac{R_2^3 - R_k^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{6 + 0.5 \operatorname{tg}^2(\beta)}{2 \cdot N} \cdot \left(\frac{1}{R_k^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{\operatorname{tg}(\beta) \cdot (2.5 \operatorname{tg}^2(\beta) + 12)}{N^2} \cdot \left(\frac{1}{R_k} - \frac{1}{R_2} \right) \cdot \frac{\operatorname{tg}^2(\beta) \cdot (20 + 6.5 \operatorname{tg}^2(\beta))}{N^3} \right) \times \\ & \times \ln \left| \frac{R_2}{R_k} \right| + \frac{\operatorname{tg}^2(\beta) \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\beta))}{N} \cdot \left(\frac{1}{(N - \operatorname{tg} \beta \cdot R_2)^2} - \frac{1}{(N - \operatorname{tg} \beta \cdot R_k)^2} \right) + \\ & \left. + \frac{4 \cdot \operatorname{tg}^2(\beta) \cdot (2 + \operatorname{tg}^2(\beta))}{N^2} \cdot \left(\frac{1}{(N - \operatorname{tg} \beta \cdot R_2)} - \frac{1}{(N - \operatorname{tg} \beta \cdot R_k)} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{\operatorname{tg}^2(\beta) \cdot (20 + 6.5 \cdot \operatorname{tg}^2(\beta))}{N^3} \cdot \ln \left| \frac{N - \operatorname{tg}(\beta) \cdot R_k}{N - \operatorname{tg}(\beta) \cdot R_2} \right| \right) \end{aligned} \right),$$

$$N = H + \operatorname{tg}(\beta) \cdot R_k.$$

Подставив в уравнение баланса мощностей все найденные значения мощностей сил деформирования, сил среза и трения в зоне 6, а также в зонах 5и 7 (по аналогии с зоной 4 [8]) и, сократив на множитель $2\pi \cdot \sigma_s \cdot R_k \cdot H \cdot V_5$, после необходимых преобразований можно получить выражение для определения приведенного давления \bar{p}_2 требуемого для деформирования материала противодействующей среды:

$$\bar{p}_2 = \frac{\sqrt{2}}{3} M + \frac{1}{\sqrt{3}} \operatorname{tg} \beta + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{\sin 2\beta} + \frac{\mu_s}{\operatorname{tg} \beta} \right) \ln \left(\frac{H}{h} \right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\ln \frac{R_3 R_k}{R_2 R_1} + \mu_s \frac{R_k - R_1}{H} \right] \quad (2)$$

При плоскодеформированном состоянии металла в зоне фланца дифференциальное уравнение равновесия имеет вид [3]:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} - \frac{2\tau_k}{h} = 0.$$

Решение этого уравнения совместно с условием пластичности $\sigma_r - \sigma_\theta = -\beta \sigma_s$ при граничном условии $r = R_1, \sigma_r = 0$ можно получить соотношения для напряжений:

На кромке фланца при $r = R_1, \sigma_z = 0.5\beta \sigma_s$. А чтобы свести его к нулю, надо накладывать на систему радиальное давление, равное $q_0 = \Delta \sigma_r = -0.5\beta \sigma_s$.

Предполагаем, что известен коэффициент m_s , характеризующий отношение напряжений текучести материалов заготовки и противодействия при данных условиях и степенях деформации:

$$m_s = \sigma_{s1} / \sigma_{s2}$$

Тогда, при известном значении необходимого для выдавливания фланца противодействия q_0 (равного давлению \bar{p}_2) для приведенных значений давления \bar{p}_2 и $\bar{q}_0 = 0.5\beta = 1/\sqrt{3}$ можно записать:

$$\bar{p}_2 \geq m_s \bar{q}_0 = m_s / \sqrt{3} \quad (3)$$

Пользуясь зависимостью (2) или графиками (см. рис. 2, б) можно назначить параметры h/H , $n = R_1/R_2$, R_3/R_2 , μ_s , достаточные для создания давления \bar{p}_2 , удовлетворяющего условию (3) и достаточного для получения требуемых параметров детали.

Для оценки использованного ресурса пластичности при радиальном выдавливании фланцев использовали феноменологическую теорию деформируемости [9]. Как известно, пластическая деформация металлов сопровождается изменением параметров микро- и макроструктуры в результате которых зарождаются и развиваются микро и макродефекты, накопление которых приводит к уменьшению ресурса пластичности или разрушению. Вероятность разрушения металлов прогнозируют при помощи деформационных критериев, в которых в качестве количественной характеристики пластичности материала принята предельная степень деформации e_p [9, 10]. При холодной деформации значения e_p зависят, в основном, от напряженного состояния и его изменения в процессе пластической деформации. Для количественной оценки влияния силового поля на e_p при объемном напряженном состоянии необходимо использовать не менее трех инвариантных характеристик напряженного состояния в качестве координат пространства, в котором данное поле исследуется. При практическом использовании такого подхода вид траектории нагружения зависит не только от условий формоизменения, но и от механических характеристик металла, который деформируется. Поэтому для исследования пластичности металлов при объемном напряженном состоянии целесообразно использовать пространство с координатами: показатель напряженного состояния [9, 10]

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3}I_2(D_\sigma)} = \frac{3\sigma}{\sigma_u}, \quad (4)$$

параметр Лоде - Надаи

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (5)$$

и степень деформации e_u .

Основное преимущество выбора таких координат заключается в том, что в выбранном трехмерном пространстве вид траектории нагрузки зависит только от условий формоизменения и не зависит от физико-механических характеристик деформируемого металла [9, 11]. А зависимость пластичности данного металла от схемы напряженного состояния определяется поверхностью предельных деформаций $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ [11].

От координат η , μ_σ , e_u легко перейти к координатам, которые определяются инвариантными характеристиками напряженного состояния. Для этого по данному значению степени деформации e_u и кривой течения $\sigma_s(e_u)$ определяется интенсивность напряжений σ_s и выполняется переход к пространству главных напряжений или других инвариантных характеристик напряженного состояния [11].

В общем случае объемного напряженного состояния зависимость пластичности от схемы напряженного состояния определяется поверхностью предельных деформаций $e_p(\eta, \mu_\sigma)$. При построении поверхности $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ необходимо обеспечить условия, при которых $\eta = const$, $\mu_\sigma = const$ на протяжении всего процесса пластической деформации до разрушения. Точки поверхности предельных деформаций, которые соответствуют значениям $\eta = -1, \mu_\sigma = 1$;

$\eta = 0, \mu_\sigma = 0$; $\eta = 1, \mu_\sigma = -1$ получают в результате опытов на сжатие, кручение и растяжение по известным методикам [9, 10, 11].

Для определения экспериментального значения предельной деформации при растяжении использован способ испытания на основе двустороннего радиального выдавливания [12]. Преимущество этого способа перед исследованиями на растяжение заключается в том, что в области кромки фланца показатель жесткости напряженного состояния $\eta=1,00\pm 0,05$, как при чистом растяжении, а локализация деформации отсутствует. Такое значение показателя напряженного состояния сохраняется на протяжении всего процесса формоизменения. Поэтому способ [12] позволяет получить более точные значения предельной деформации, чем другие известные методики. Полученные данным способом значения предельных деформаций практически совпадают со значениями полученными по методике В.А. Огородникова [13].

По результатам расчета напряженно-деформированного состояния заготовок, выполненного при помощи метода конечных элементов, строили траектории нагружения опасных точек на кромке фланца для обычного радиального выдавливания и выдавливания с противодавлением. Поверхность предельных деформаций для алюминиевого сплава АД1 аппроксимировали функцией [10]:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = 1,20 \exp(0,42\mu_\sigma - 0,50\eta).$$

Расчет использованного ресурса пластичности вели по критерию, основанному на нелинейном законе накопления повреждений в условиях объёмного напряжённого состояния (табл. 1) [14, 15]

$$\psi = \int_0^{e_u} n \frac{e_u^{*n-1}}{e_p(\eta, \mu_\sigma)^n} de_u^*, \tag{6}$$

где $n = 1 + a \frac{d\eta}{de_u} - b \frac{d\mu_\sigma}{de_u}$;

a, b – эмпирические коэффициенты, которые для стали 10 и сплава АД1 принимали равными a = 0,05, b = 0,03.

Таблица 1

Использованный ресурс пластичности при радиальном выдавливании фланцев без противодействия Ψ_1 и с использованием противодействия Ψ_2

Материал	$\frac{H}{R_0}$	$\frac{R_1}{R_0} = 1,5$		$\frac{R_1}{R_0} = 2,0$		$\frac{R_1}{R_0} = 2,5$	
		Ψ_1	Ψ_2	Ψ_1	Ψ_2	Ψ_1	Ψ_2
АД 1	0,6	0,26	0,11	0,62	0,25	-	-
	1,0	0,14	0,06	0,34	0,14	0,80	0,33
	1,4	0,08	0,032	0,18	0,08	0,42	0,17

Использование противодействия, которое создаётся техническим свинцом, позволило уменьшить величину использованного ресурса пластичности в 2,5 раза при выбранных параметрах процесса. Установлено, что основное влияние на величину противодействия оказывают предел текучести вспомогательного металла, силы трения и размеры щели, в которую выдавливается материал, создающий противодействие.

Выводы

Рассмотрены разновидности технологических способов выдавливания с противодавлением, направленных на снижение дефектов формы при изготовлении деталей выдавливанием. Для снижения отклонений формы и предотвращения разрушений при холодного деформировании эффективно обеспечение более жесткой схемы напряженного состояния при создании противодействия в направлении истечения металла. При выдавливании деталей с фланцами противодействие создают при помощи пластичной среды, деформируемой с преимущественным радиальным истечением в зазор между полуматрицами.

Энергетическим методом верхней оценки (баланса мощностей) установлены зависимости для определения давления деформирования противодействующей среды, позволяющие установить

геометрические параметры инструмента, достаточные для создания противодействия, необходимого для получения качественных деталей с фланцами.

Используя феноменологическую теорию деформируемости выполнена оценка степени расхода ресурса пластичности деформируемого металла и установлена возможность повышения степени деформирования фланцев при приложении противодействия.

Список использованной литературы

1. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов / В.А. Евстратов. - Харьков: Вища школа, 1987. - 142 с.
2. Овчинников А.Г. Основы теории холодного выдавливания на прессах / А.Г. Овчинников. - М.: Машиностроение, 1987. - 205 с.
3. Алиева Л. И., Перспективы развития процессов точной объемной штамповки выдавливанием / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков // Вісник ДДМА: Зб. наук. пр. - Краматорськ: ДДМА, 2008. - № 1 (11). - С. 13-19.
4. Алиев И. С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. - 1988. - №6. - С. 1-4.
5. Коган Р.М. Штамповка с противодействием / Р.М. Коган // Конструирование и технология машиностроения. Сер В, 1965. №2 - С. 1-7.
6. Алиев И.С. Моделирование процесса радиального выдавливания с применением противодействия / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Е.И. Коцюбовская // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением: сб. науч. тр. - Краматорск: ДГМА, 2006. - С. 53-58.
7. Теорияковки и штамповки / Е.П. Унксов [и др.]. Под общ. ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. - М.: Машиностроение, 1992. - 720 с.
8. Алиева Л. И. Анализ процесса последовательного радиально-прямого выдавливания методом кинематических модулей / Л.И. Алиева, О. В. Чучин // Научный Вестник ДГМА. - Краматорск: ДГМА, 2015. - № 3 (18Е). - С. 5-21.
9. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В.А. Огородников - Киев: Вища школа, 1983. - 175с.
10. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров - М.: Металлургия, 1970. - 229 с.
11. Сивак И.О. Поверхность предельной пластичности // И.О. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Тематич.зб. наук. пр. - Краматорськ: ДДМА. 1999. - С. 9 - 15.
12. Пат. 63208А України, G01N3/28. Спосіб випробування металевих зразків для визначення граничної пластичної деформації / І.С.Алієв, І.Г.Савчинський, Л.І.Алієва, К.І.Сивак (Україна). - №2003021779; Заявл. 28.02.2003; Опубл. 15.01.2004, Бюл. №1.
13. Огородников В.А. Диаграммы пластичности и особенности их построения / В.А. Огородников, И.Ю. Кирица, В.И. Музычук // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: Зб. наук. пр. - Краматорськ, 2006. - С. 251 - 255.
14. Оценка деформируемости заготовок при радиальном выдавливании с противодействием / Е. И. Коцюбовская, И. О. Сивак, Л. И. Алиева, С. В. Куценко // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. - Краматорск: ДГМА, 2008. - № 1 (19). - С. 29-33.
15. Алиева Л.И. Деформируемость заготовок при радиальном выдавливании с противодействием / Л.И. Алиева, Е.И. Коцюбовская. // Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта. Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції - 21-24 червня 2016 - Одеса-Київ : Національний технічний університет України «КПІ», 2016. - С. 61- 64.