

УДК 621.73.043

Алиев И. С.
Абхари П. Б.
Еремина А. А.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ШТАМПОВКИ РАДИАЛЬНЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ В ЗАКРЫТЫХ ШТАМПАХ

В настоящее время область применения штамповки в закрытых штампах с элементами выдавливания непрерывно расширяется. Применение этого метода позволяет на 15–35 % [1] уменьшить расход металла в результате исключения заусенца, а в некоторых случаях – напусков и припусков на механическую обработку. Конечной целью технологии штамповки в закрытых штампах является повышение коэффициента использования материала путем разработки оптимального процесса, не предусматривающего отхода материала в заусенец, снижение нагрузки при штамповке путем контроля деформации в необходимых направлениях в целях экономии электроэнергии, а также повышение автоматизации процесса штамповки. В последнее время штамповка в закрытых штампах стала основной технологией.

Анализ конфигурации деталей показал, что наиболее прост и эффективен перевод со штамповки в открытых штампах на штамповку в закрытых штампах поковок типа стрелы с отрезками, со сферическими или коническими утолщениями; с плоским фланцем, имеющим одну или несколько осей симметрии в плане, шестерен с плоским или сложным венцом. В работах Алиева И. С., Журавлева А. З., Кондратенко В. Г. [2, 3] проанализировано определение силовых параметров закрытой штамповки осесимметричных заготовок при заполнении полостей. Реальные процессы штамповки даже простейших деталей включают элементы выдавливания (рис. 1) [4].

Штамповка в закрытых штампах предусматривает использование пуансонов для выдавливания материала в предварительно закрытую матрицу для заполнения ее рабочего пространства. Управляя ходом пуансона, можно осуществлять контроль за течением металла для достижения оптимальной деформации. Ход верхнего и нижнего пуансонов может задаваться в режиме синхронный, асинхронный и с противодействием в целях значительного снижения формирующей нагрузки либо повышения качества заполнения рабочего пространства матрицы материалом. В представленном исследовании рассматривалась односторонняя подача металла. Исследования процессов закрытой штамповки деталей различного типа показали, что в большинстве случаев при наличии в штампе компенсаторов высокая точность исходной заготовки не является главным, как это принято считать. Более важным является предварительная подготовка исходной заготовки или точная фиксация заготовки в штампе. В тех случаях, когда обеспечивается оформление на предварительных этапах деформирования контура заготовки применение простейших компенсаторов [5] позволяло избежать перегрузки пресса при использовании заготовок нормальной точности. Компенсатор заполняется равномерно по всему его периметру.

Для моделирования процесса использовался программный комплекс QForm, в основе которого лежит метод конечных элементов. С помощью данной программы был изучен процесс радиального выдавливания детали с фланцем на конце стержня. Также были определены интенсивность напряжений, энергосиловые параметры и деформация на различных стадиях процесса. Предложенный технологический процесс позволяет снизить массу деталей, увеличить коэффициент использования материала, повысить производительность труда и сократить сроки подготовки производства и трудоемкость изготовления изделий [6].

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов, а также силовых параметров процесса штамповки радиальным выдавливанием в закрытых штампах методом энергетического баланса мощностей.

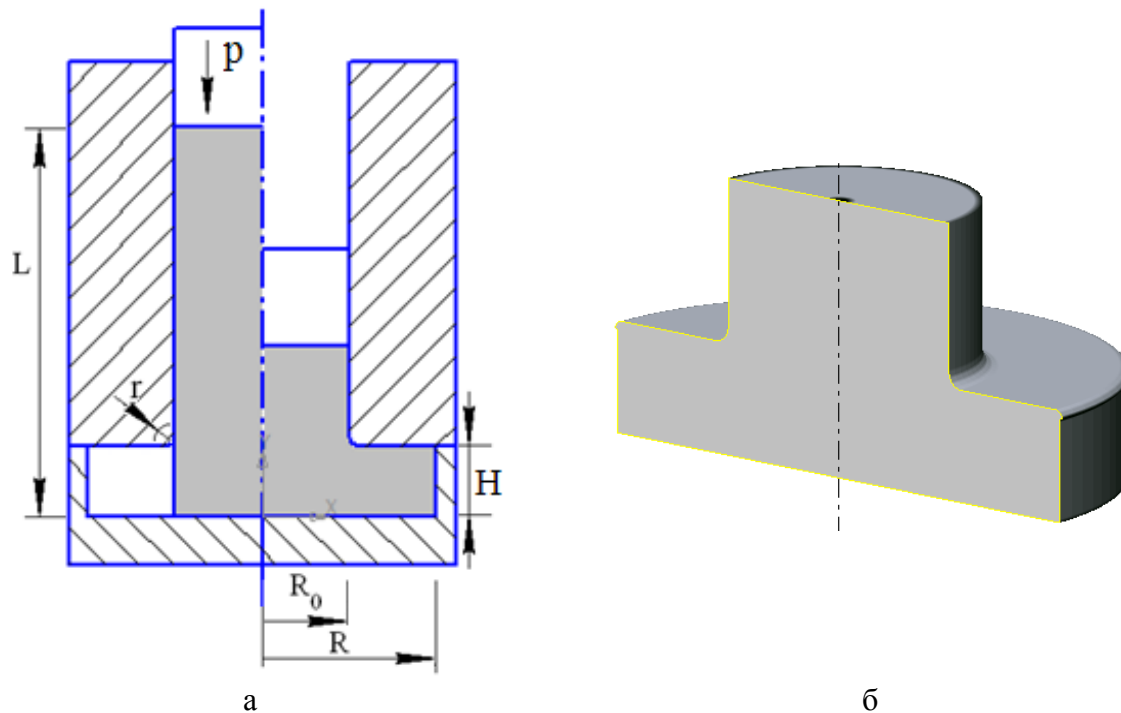


Рис. 1. Процесс радиального выдавливания заготовки в закрытых штампах:
а – схема выдавливания заготовки в разъемных матрицах; б – конечный полуфабрикат

Моделирование процессов выдавливания деталей в закрытом штампе было выполнено с помощью конечно-элементного моделирования. Представлены схемы радиального выдавливания в разъемных матрицах при различных соотношениях хода пуансона к начальному радиусу исходной заготовки. Схемы исследуемых заготовок представлены на рис. 2.

Для моделирования процесса радиального выдавливания фланца на конце стержня с односторонней подачей в закрытых штампах выбирали следующие параметры:

- механические свойства: материал заготовки АМцМ, кривая истинных напряжений для которого описывается уравнением $\sigma_s(\varepsilon) = 188,4 \varepsilon^{0,15}$, предел текучести $\sigma_{0,2} = 105$ МПа, модуль Юнга $E = 75000$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$ и коэффициент трения между материалом заготовки и инструментом $\mu = 0,08$ (закон Зибеля).

- геометрические параметры процесса: R_0 – радиус заготовки ($R_0 = 18$ мм), R – наружный радиус фланца ($R = 36$ мм), H – высота приемной полости для выдавливаемого фланца ($H = 14,4$ мм) и $H/R_0 = 0,8$, r – радиус закругления кромок инструмента ($r = 2$ мм), L – высота заготовки ($L = 80$ мм).

В ходе моделирования были получены картины интенсивности напряжений, а также распределения деформации в процессе радиального выдавливания в разъемных матрицах закрытого штампа (рис. 2). Также представлены делительные сетки на стадии деформирования.

Картина распределения интенсивности напряжений показывает, что при выдавливании фланца минимальное значение интенсивности напряжений равняется $\sigma_i = 110$ МПа, а максимальное достигает значения $\sigma_i = 180$ МПа на линии контакта заготовки с нижней кромкой матрицы при соотношении геометрических параметров $S/R_0 = 0,88$. Максимальное значение интенсивности деформации, которая находится в центре очага деформации, равняется $\varepsilon_i = 1,7$.

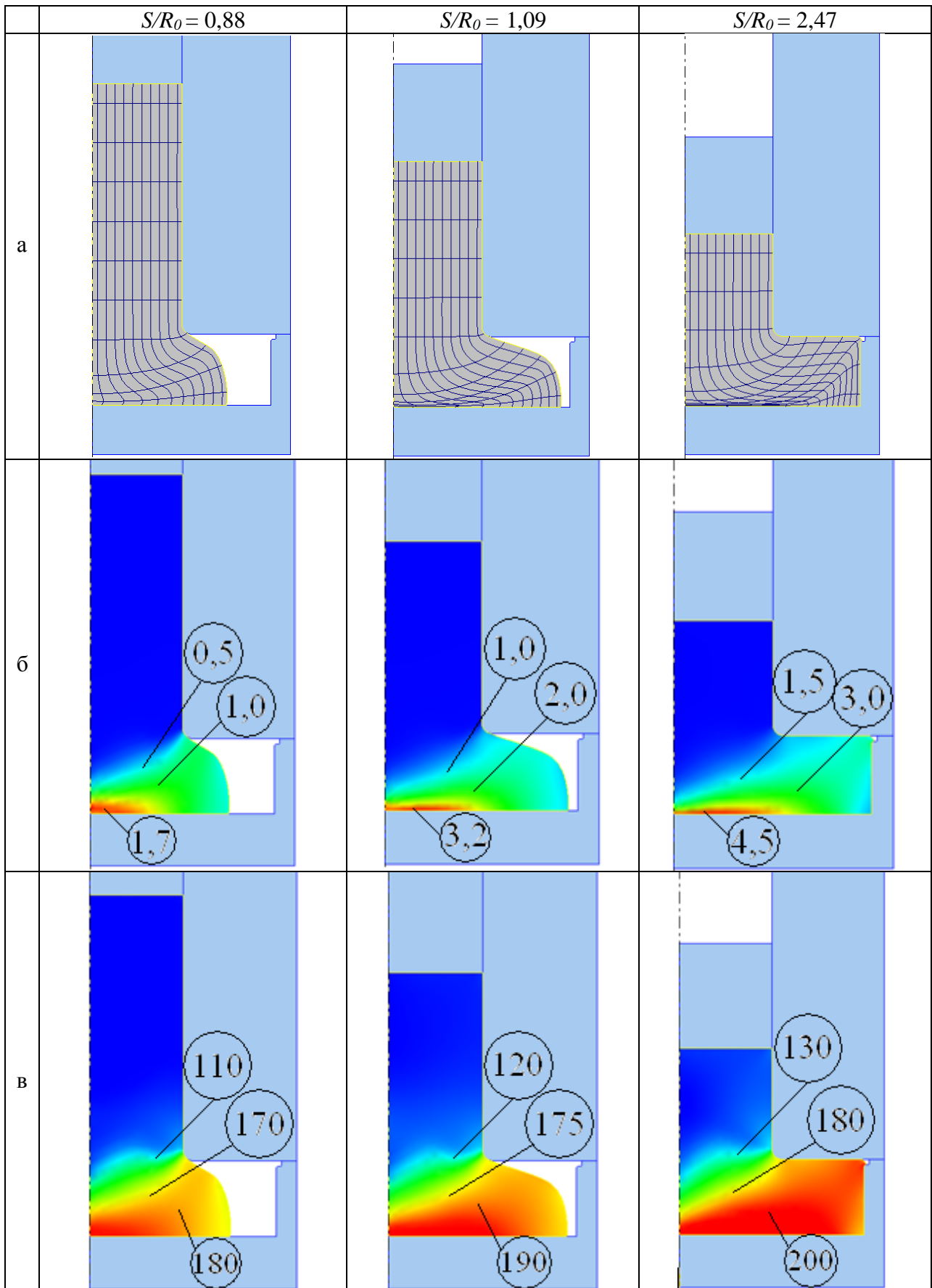


Рис. 2. Искажение делительной сетки по ходу деформирования (а), распределения интенсивности деформации (б) и распределение интенсивности напряжений, МПа (в)

Моделирование выдавливания при соотношении геометрических параметров $S/R_0 = 1,09$ показывает, что максимальные значения интенсивности напряжений распределяются равномерно с заполнением металлом полости матрицы и достигают максимального значения $\sigma_i = 190$ МПа. Минимальное значение σ_i на данном этапе равняется 120 МПа. Максимальное значение интенсивности деформации, которая находится в центре очага деформации, равняется $\varepsilon_i = 3,2$.

Выдавливание плоского фланца показывает максимальное значение $\sigma_i = 200$ МПа, равномерно распределенное по полости матрицы, при $S/R_0 = 2,47$. Полость матрицы полностью заполняется, что формирует фланец без дефектов. Максимальное значение интенсивности деформации, которая находится в центре очага деформации, равняется $\varepsilon_i = 4,5$.

Теоретическое исследование процессов штамповки поковок с плоскими фланцами и сферическими утолщениями в одноручьевых штампах показало, что они могут быть разбиты на четыре характерные этапа.

Первые два этапа деформирования – свободная осадка заготовки и стесненная осадка протекают аналогично для поковок всех типов. Эти два этапа достаточно изучены.

Третий этап – свободное истечение металла для оформления фланца, изучен мало. Оказалось, что независимо от способа приложения нагрузки, основным фактором, определяющим границы очага деформации и форму фланца на этом этапе, является отношение H/R_0 . Процесс свободного истечения может быть схематизирован (рис. 3).

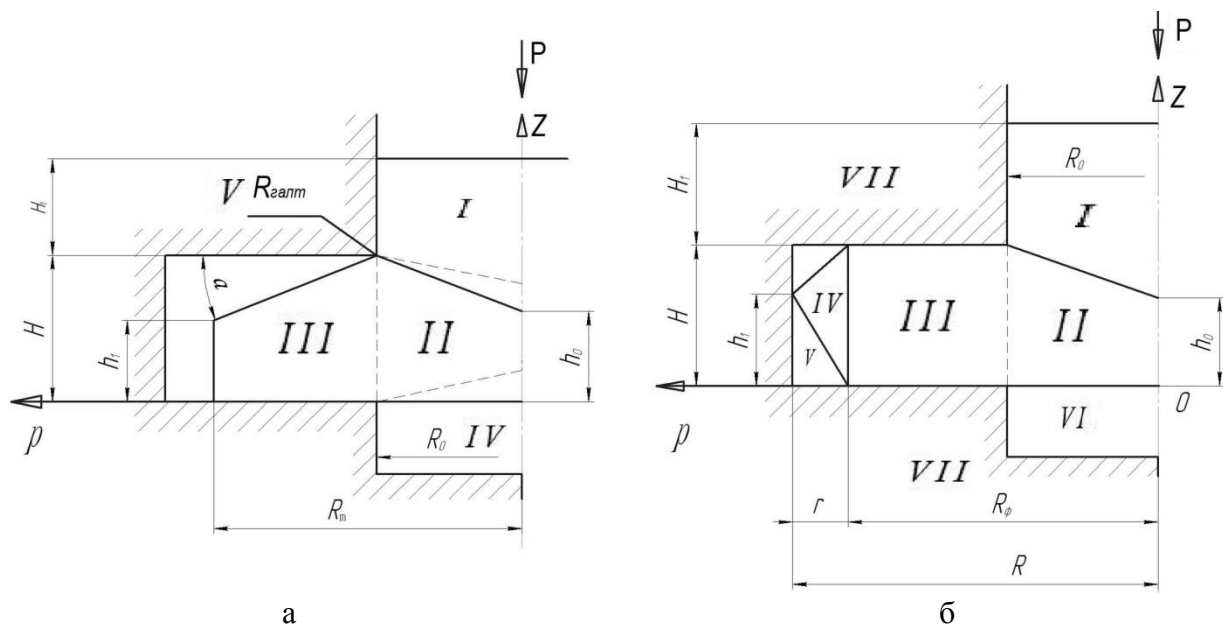


Рис. 3. Схема очагов деформации:

а – этап свободного истечения для поковок с плоским фланцем; б – заключительный этап заполнения плоского осесимметричного фланца

При этом предполагается, что приемники (зоны I и IV) в штампе полностью заполнены металлом и не деформируются (жесткие ступицы). Металл, ограниченный цилиндрической поверхностью по диаметру приемника и высотой, равной высоте кольцевой полости (зона II), осаживается, испытывая сопротивление со стороны металла, вытекающего в кольцевую зону III. Реальные границы зон I и VI показаны пунктиром. Для упрощения математического описания процесса зона I увеличена, а зона IV уменьшена до границ, показанных сплошными линиями. При этом объем зоны II остался неизменным. Текущие размеры фланца h_f , α в зависимости от перемещения Δh пуансона можно определить как функции от H/R_0 и R_0 [1]. В случае использования этого этапа деформирования для предварительной штам-

повки в качестве заготовительной операции при изготовлении осесимметричных поковок со сложными фланцами типа цилиндрических и конических шестерен с ободом, используя упомянутые зависимости, возможно спроектировать предварительный ручей, формоизменение в котором обеспечит минимальное усилие деформирования в окончательном ручье и тем самым его максимальную стойкость. При штамповке поковок с осесимметричным плоским фланцем заключительный этап – этап заполнения угловых полостей.

Используя энергетический метод баланса мощностей, получим следующее выражение для определения удельного усилия деформирования:

$$\begin{aligned} \bar{p} = \frac{p}{\sigma_s} = & 1,1 \cdot \left(1 + \ln \frac{\bar{R} \cdot \bar{r}}{\bar{R}_0} \right) + \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{1 - h_0}{\bar{R}_0} \right)^2}}{(1 - h_0)^2} \cdot \left(\frac{\bar{R}_0 \cdot (1 - h_0)}{2} - \frac{\bar{h}_0 \cdot \bar{R}_0}{(1 - h_0)} \cdot \ln \frac{1}{\bar{h}_0} + \bar{h}_0 \cdot \bar{R}_0 \right) + \\ & + \frac{1}{\bar{R}_0} + \frac{1,1 \cdot \left(\bar{R}^2 - 8 \cdot \bar{R} \cdot \bar{r} + 3 \cdot \bar{r}^2 \right)}{6 \cdot \left(2 \cdot \bar{R}^2 - 3 \cdot \bar{R} \cdot \bar{r} + \bar{r}^2 \right)} + \frac{2 \cdot \bar{R}^2 - 6 \cdot \bar{R} \cdot \bar{r} + 3 \cdot \bar{r}^2}{4 \cdot \left(2 \cdot \bar{R}^2 \cdot \bar{r} - 3 \cdot \bar{R} \cdot \bar{r}^2 + \bar{r}^3 \right)} + \frac{2 \bar{R} \cdot \bar{r} - \bar{r}}{8} + \\ & + \frac{(1 - \bar{r})^2}{8 \cdot \bar{r}^2} \cdot \frac{2 \cdot \bar{R}^2 \cdot \bar{r} - \bar{r}^2}{(\bar{R} - \bar{r})} + 2 \cdot \mu \cdot \left(\bar{R} - \bar{R}_0 - \bar{r} + \frac{\bar{H}_1}{\bar{R}_0} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_s – напряжение текучести материала поковки; p и \bar{p} – абсолютное и относительное значения удельного усилия на пуансоне; \bar{R}_T , \bar{H}_1 , \bar{R}_0 и т. д. – относительные размеры, т. е. все геометрические размеры элементов поковки (рис. 3, а), отнесенные к высоте фланца H ; μ – коэффициент трения; \bar{a} – варьируемый параметр.

Варьируемый параметр \bar{a} находили из условия минимума мощности для зоны II. Полученные зависимости схематизированы и обработаны с помощью ЭВМ. Оказалось, что величина \bar{a} существенно зависит от отношения H/D_0 :

$$\bar{a} = 0,03 + 0,5 \cdot \left(\frac{2H}{D_0} - 0,42 \right)$$

$$\text{для } 0,42 \leq \frac{2H}{D_0} \leq 0,72, \quad \bar{a} = 0,18 \quad \text{для } \frac{2H}{D_0} > 0,72.$$

Величину распорных усилий при штамповке деталей данного класса можно оценить по следующей методике. Граничные условия для различных отношений величины фаски к высоте фланца определяли методом характеристик, используя известный подход. Затем составляли дифференциальное уравнение равновесия кольцевого элемента фланца, которое решали, учитывая условие пластичности Треска-Сен-Венана. Находили радиальное и тангенциальное напряжения. Осевое напряжение, определяющее усилие распора, принималось как их полусумма. Усилие распора находилось интегрированием осевого напряжения

σ_z по плоскости фланца с уменьшением его на величину силы трения в верхней ступице поковки.

Для оценки влияния геометрических характеристик поковки на распорные усилия получена зависимость:

$$\bar{p}_p = \frac{P_p}{\sigma_s} = - \left(2,2 + 4,0 \cdot (0,45 - r) \right) \cdot \frac{\bar{R}\phi - R_0}{\bar{R}_0} + \beta \cdot \frac{\bar{R}\phi}{\bar{R}_0} \cdot \ln \frac{\bar{R}\phi}{\bar{R}} - \beta \cdot \ln \frac{\bar{R}_0}{\bar{R}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu}{\bar{R}_0} \times$$

$$\times \left(2 \cdot \bar{R}\phi - 2 \cdot \bar{R}^3 - 3 \cdot \bar{R} \cdot \bar{R}\phi + 3 \cdot \bar{R} \cdot R_0 \right) - 2 \cdot \mu \cdot H_1, \quad (2)$$

где $\beta = 1,15$.

Зависимость (2) дает удовлетворительные результаты при определении усилий распора на заключительном этапе штамповки.

На этапе свободного истечения (рис. 3, а) следует пользоваться зависимостью:

$$\bar{p}_p = \frac{P_p}{\sigma_s} = \left(1 + 1,1 \cdot \Delta m \frac{R_m}{R_0} \right) \cdot \frac{R_{зам}}{R_0} \cdot \frac{\left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{зам}}{R_0} \right)}{\left(R_0^2 - 1 \right)} \quad (3)$$

Характерной особенностью процессов штамповки в закрытых штампах с элементами выдавливания в разъемных матрицах является то, что они должны осуществляться за один рабочий ход. Поэтому очень важным является выбор прессы для штамповки.

ВЫВОДЫ

Методом конечных элементов исследовано напряженно-деформированное состояния процесса радиального выдавливания в закрытых штампах с односторонней подачей при различном соотношении геометрических параметров. Установлено, что максимальное значение интенсивности напряжений наблюдается в зонах, контактирующих с полостью матрицы. Минимальные значения деформации наблюдаются в стержневой части поковки. Так, равномерное распределение σ_i по фланцу дает возможность получения готовой детали без дефекта. Также были получены расчетные зависимости силовых параметров методом энергетического баланса мощностей. Полученные сведения позволяют подобрать оптимальные параметры процесса, а также дать технологические рекомендации для получения деталей с фланцем методом радиального выдавливания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратенко В. Г. *Определение формы заготовки при штамповке* / В. Г. Кондратенко, Ф. С. Абдулаев, А. И. Кузьмин // *Машиностроение*, 1979. – № 8. – С. 121–123.
2. Журавлев А. З. *Основы теории штамповки в закрытых штампах* / А. З. Журавлев // *Машиностроение*, 1973. – С. 224.
3. Алиев И. С. *Анализ энергосилового режима процесса закрытой штамповки* / И. С. Алиев // *Известия ВУЗов. Машиностроение*. – 1989. – № 4. – С. 132–135.
4. Алиев И. С. *Моделирование процесса штамповки в закрытых штампах методом конечных элементов* / И. С. Алиев, П. Б. Абхари, А. А. Ерёмкина // *Пластическая деформация металлов: сб. науч. тр. в 2-х т.* – Днепропетровск : Акцент ПП., 2014. – Т. 1. – С. 192–196.
5. Алиев И. С. *Выдавливание стержневых деталей с фланцем в разъемных матрицах* / И. С. Алиев, А. И. Лобанов, О. К. Савченко // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2007. – № 11. – С. 25–28.

6. Алиева Л. И. *Формоизменение при радиальном выдавливании фланцев* / Л. И. Алиева, С. В. Мартынов, Я. Г. Жбанков // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. – Краматорськ, 2006. – № 1Е (6). – С. 136–139.

7. Кондратенко В. Г. *Исследование силовых параметров штамповки выдавливанием осесимметричных поковок в закрытых штампах* / В. Г. Кондратенко, Ф. С. Абдулаев, Л. С. Гаманкова // *Машиностроение*, 1979. – № 7. – С. 86–89.

8. *Технологические процессы изготовления поковок с фланцами на прессах для штамповки в разъемных матрицах* / В. Г. Кондратенко, М. В. Блинов, М. А. Илинч [и др.] // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 1985. – № 4. – С. 11–14.

REFERENCES

1. Kondratenko V. G. *Opređenje formy zagotovki pri shtampovke* / V. G. Kondratenko, F. S. Abdulaev, A. I. Kuz'min // *Mashinostroenie*, 1979. – № 8. – S. 121–123.

2. Zhuravlev A. Z. *Osnovy teorii shtampovki v zakrytyh shtampah* / A. Z. Zhuravlev // *Mashinostroenie*, 1973. – S. 224.

3. Aliev I. S. *Analiz jenergosilovogo rezhima processa zakrytoj shtampovki* / I. S. Aliev // *Izvestija VUZov. Mashinostroenie*. – 1989. – № 4. – S. 132–135.

4. Aliev I. S. *Modelirovanie processa shtampovki v zakrytyh shtampah metodom konechnyh jelementov* / I. S. Aliev, P. B. Abhari, A. A. Erjomina // *Plasticheskaja deformacija metallov: sb. nauch. tr. v 2-h t. –Dnepropetrovsk : Akcent PP.*, 2014. – T. 1. – С. 192–196.

5. Aliev I. S. *Vydavlivanie sterzhnevyyh detalej s flancem v razemnyh matricah* / I. S. Aliev, A. I. Lobanov, O. K. Savchenko // *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. – 2007. – № 11. – S. 25–28.

6. Alieva L. I. *Formoizmenenie pri radial'nom vydavlivanii flancev* / L. I. Alieva, S. V. Martynov, Ja. G. Zbankov // *Visnik Donbas'koi derzhavnoi mashinobudivnoi akademii*. – Kratators'k, 2006. – № 1Е (6). – S. 136–139.

7. Kondratenko V. G. *Issledovanie silovykh parametrov shtampovki vydavlivaniem osesimmetrichnykh pokovok v zakrytyh shtampah* / V. G. Kondratenko, F. S. Abdulaev, L. S. Gamankova // *Mashinostroenie*, 1979. – № 7. – S. 86–89.

8. *Tehnologicheskie processy izgotovlenija pokovok s flancami na pressah dlja shtampovki v razjomnyh matricah* / V. G. Kondratenko, M. V. Blinov, M. A. Ilinich [i dr.] // *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. – 1985. – № 4. – S. 11–14.

Алиев И. С. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД ДГМА;

Абхари П. Б. – канд. техн. наук, доц. каф. ОМД ДГМА;

Еремина А. А. – аспирант каф. ОМД ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: omd@dgma.donetsk.ua

Статья поступила в редакцию 21.09.2015 г.