

трубной заготовки, для устранения которой требуется дополнительный проход.

Для устранения огранки и более полного заполнения профиля после первого прохода полуфабрикат извлекали (выталкивали) из калибра, поворачивали на 45° , в некоторых случаях «поджимали» ролики и обжимали его между ними повторно.

На рисунке 6 показаны фотографии оправки и ствола пистолета-пулемета «Эльф» после профилирования и механической обработки.

Проведенные компьютерное моделирование и натурные эксперименты показали эффективность технологии изготовления толстостенных изделий с криволинейными канавками на внутренней поверхности с профилем сложной конфигурации методом обжатия трубных заготовок по профильной оправке прокаткой (волочением) неприводными роликами.

Выводы

1. Методом компьютерного моделирования исследован процесс формирования полигональных дорожек на внутренней поверхности трубчатой заготовки путем прокатки (волочения) в неприводных роликах и определены энергосиловые параметры процесса.

2. По результатам компьютерного моделирования усовершенствована конструкция экспериментального устройства для изготовления стволов украинских пистолетов-пулеметов, разработанных в КБ СТ. Эффективность полученных результатов проверена при изготовлении первых в Украине опытных образцов пистолетов-пулеметов.

Литература

1. DEFORM™ 3D. Version 6.1 User's Manual Scientific Forming Technologies Corporation, 2008j. —420s.
2. Пасечник С. Пистолет – пулемет "Эльф-2"/ С. Пасечник // Охота и оружие. – 2000. – № 6. – С.6-7.
3. Справочник по оборудованию для листовой штамповки. Под общей редакцией Рудмана Л.И.; Киев, «ТЕХНИКА», 1989г.-233с.

Холодное выдавливание с дифференцированным противодавлением полостей штампов

д.т.н. проф. Калюжный В.Л., Пиманов В.В.
НТУУ «КПИ»

8(044)454-96-11, k_omd@ukr.net, 8(044)454-96-11, pimanov@ukr.net

Аннотация: В работе инженерным методом получены зависимости для определения напряжений на контактных поверхностях заготовки и инструмента, усилия выдавливания полостей сферическим пуансоном. Компьютерным моделированием методом конечных элементов проведены численные эксперименты на примерах выдавливания сферическим пуансоном заготовок из стали Р6М5 в условиях действия противодействия на свободную поверхность заготовки. С помощью моделирования установлено необходимое максимальное противодействие, которое обеспечивает выдавливание без разрушения, усилия процессов, распределения напряжений на деформирующем инструменте, напряженно-деформированное состояние и степень использования ресурса пластичности металла, а также конечные размеры изделий. Проведено экспериментальное выдавливание заготовок из стали Р6М5 сферическим пуансоном.

Ключевые слова: холодное выдавливание полостей, дифференцированное противодействие, моделирование, инженерный метод, метод конечных элементов.

Введение

Современное развитие холодной объемной штамповки связано с усложнением формы изделий и расширением марки сталей и сплавов, из которых изготавливают изделия повышенной надежности и долговечности. Для повышения стойкости деформирующего инстру-

мента штампов для горячей объемной и листовой штамповки, пресс-форм и литейных форм при изготовлении таких деталей используют холодное выдавливание (ХВ). Эффективность ХВ для изготовления деталей штампов и пресс-форм приведена в [1]. Однако из-за низкой пластичности штамповых и инструментальных сталей традиционное ХВ не обеспечивает больших глубин вдавливания пуансона, а также имеет место незаполнение гравюры полости сложной формы. Для повышения пластичности сталей при холодном формообразовании изделий используют схемы выдавливания с увеличенным гидростатическим давлением в очаге деформации, например с помощью приложения противодействия жидкостью под высоким давлением. Эффективность действия жидкости под высоким давлением на пластичность при механических испытаниях образцов и в процессах прямого выдавливания показана в работах [2-5]. Получение полостей штампов и пресс-форм холодным выдавливанием с противодействием позволяет увеличить глубину вдавливания за один переход и повысить стойкость мастер-пуансонов [5]. Приложение дифференцированного противодействия на заготовку при ХВ заготовок чеканочных штемпелей и полостей, когда величина противодействия изменяется пропорционально повышению сопротивления деформированию, позволяет существенно повысить их стойкость [6,7].

Целью данной работы является определение параметров ХВ сферическим пуансоном полостей в условиях действия противодействия на свободную поверхность заготовок.

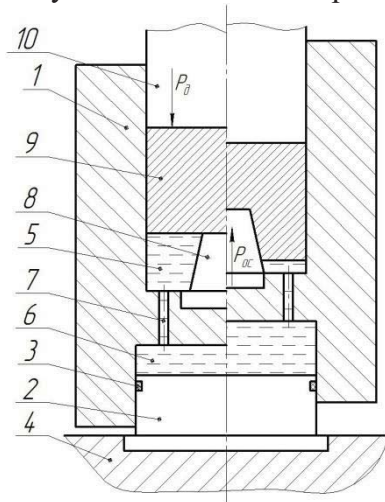


Рисунок 1. Схема выдавливания полости с противодействием

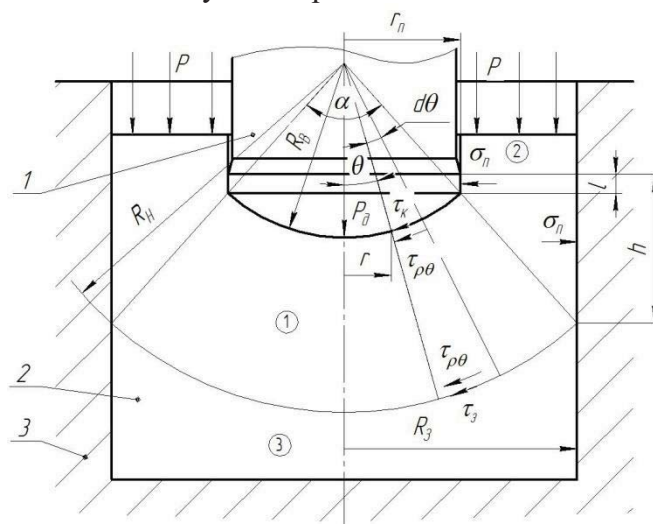


Рисунок 2. Схема выдавливания полости сферическим пуансоном для анализа ИМ

Постановка задачи. Для ХВ полостей с дифференцированным противодействием использовали схему, которая показана на рисунке 1. Исходное положение перед выдавливанием отображено слева от оси симметрии. Контейнер 1 установлен с возможностью перемещения на опоре 2 с уплотнениями 3. Опора 2 крепится на нижней плите 4 штампа. Контейнер имеет два канала разного диаметра: верхний 5 и нижний 6, которые соединены отверстиями 7 для свободного перетекания жидкости. В канал 5 установлен и зафиксирован мастер-пуансон 8.

Каналы 5 и 6 заполняют рабочей жидкостью и устанавливают заготовку 9, на торец которой прикладывают усилие P_0 через пуансон 10. Заготовка начинает перемещаться и вытесняет жидкость из канала 5 в канал 6. Контейнер 1 поднимается вверх. Когда пуансон 8 коснется заготовки 9, в жидкости возникает давление p . За счет давления и разности площадей каналов возникает осевое усилие: $P_{oc} = p (F_6 - F_5)$, где F_6 – площадь канала 6; F_5 – площадь канала 5. Действие усилия P_{oc} направлено навстречу пуансону и возрастает пропорционально росту давления p . Когда P_{oc} достигает величины необходимой для деформирования заготовки 9, пуансон 8 начинает выдавливать полость в заготовке. В процессе деформирования на свободную поверхность заготовки действует противодействие жидкости p , которое зависит от величины P_0 . Выталкивание заготовки после выдавливания осуществляют вторым ходом пресса. Контейнер 1 опускают вниз, жидкость перетекает из канала 6 в канал 5 и выталкивает

заготовку 9 с контейнера 1.

Для приведенной схемы необходимо получить аналитические зависимости для определения напряжений на контактных поверхностях и усилия выдавливания сферическим пуансоном, провести численный эксперимент методом конечных элементов (МКЭ), выполнить экспериментальные исследования и сравнить полученные результаты.

Результаты. Для расчета усилия ХВ с противодавлением полостей сферическим пуансоном проведено решение задачи инженерным методом (ИМ). Расчетная схема показана на рисунке 2. Заготовка 2, которая установлена в матрице 3 и деформируется пуансоном 1, разделена на три объема: 1 – очаг деформации, 2 и 3 недеформируемые объемы. На торец заготовки действует противодавление p . При решении задачи использовали подход Степанского Л.Г. [8]. По методике [9] учтено влияние трения на калибрующем пояске пуансона высотой l и матрице по длине h , которое приводит к возникновению удельного усилия в стенке:

$$q = 2 \cdot \mu \cdot \sigma_{s2} \frac{r_{II} \cdot l + R_3 \left[(R_3 - r_{II}) \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} + l \right]}{R_3^2 - r_{II}^2}, \quad (1)$$

где: μ - коэффициент трения, σ_{s2} - напряжение текучести деформированного металла во 2 объеме. Совместным решением уравнений равновесия в сферических координатах и приближенного условия пластичности получены формулы для определения напряжений σ_θ и σ_ρ :

$$\sigma_\theta = -\sigma_{s1} \left\{ \left[\frac{p+q}{\sigma_{s1}} \sin \frac{\alpha}{2} + 1 + \frac{1}{2\mu} \right] \left[1 + \frac{\mu}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right) \right] - 1 - \frac{1}{2\mu} \right\}, \quad (2)$$

$$\sigma_\rho = -\sigma_{s1} \left\{ \left(\frac{p+q}{\sigma_{s1}} \sin \frac{\alpha}{2} + 1 + \frac{1}{2\mu} \right) \left[1 + \frac{\mu}{\ln \frac{R_H}{R_B}} \left(\frac{\alpha}{2} - \theta \right) \right] - \frac{1}{2\mu} \right\}, \quad (3)$$

где: σ_{s1} - напряжение текучести металла в 1 объеме.

По напряжению σ_ρ из (3) и элементарной площади сферического торца пуансона $dF = R_B^2 \cdot d\varphi \cdot \sin \theta \cdot d\theta$ интегрированием определена вертикальная составляющая усилия выдавливания P_∂ с учетом расчета радиусов R_H и R_B через R_3 , r_{II} и угол θ :

$$P_\partial = \frac{2\pi r_{II}^2 \sigma_{s1}^{cp}}{\sin^2 \frac{\alpha}{2}} \left\{ \left(\frac{p+q}{\sigma_{s1}^{cp}} \sin \frac{\alpha}{2} + 1 + \frac{1}{2\mu} \right) \left[\ln \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} + \frac{\mu}{\ln \frac{R_3}{r_{II}}} \left(\frac{\alpha}{2} \ln \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} - \frac{\alpha^3}{24} \right) \right] - \frac{1}{2\mu} \ln \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right\} \quad (4)$$

где σ_{s1}^{cp} - среднее значение с учетом упрочнения напряжения текучести σ_{s1} в очаге деформации, которое по известной аппроксимации кривой упрочнения найдено в следующей последовательности:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_{uu}} \left(\frac{\psi}{\psi_{uu}} \right)^{\frac{\psi_{uu}}{1 - \psi_{uu}}}; \psi = \psi^{cp} = \frac{R_H \alpha - R_B \alpha}{2R_H \alpha} = \frac{R_H - R_B}{2R_H}; \sigma_{s1}^{cp} = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_{uu}} \left(\frac{r_{II}}{2R_3 \cdot \psi_{uu}} \right)^{\frac{\psi_{uu}}{1 - \psi_{uu}}}. \quad (5)$$

В первой формуле из (5) σ_B - предел прочности, ψ_{uu} - относительное сужение, соответ-

ствующее моменту образования шейки на образце при испытании на растяжение, ψ - текущее значение относительного сужения. Величину σ_{s1}^{cp} нужно подставлять вместо σ_{s2} при вычислении q по выражению (1).

Для проверки адекватности решения задачи ИМ был проведенный численный эксперимент МКЭ на примере выдавливания заготовки из стали Р6М5 сферическим пуансоном в условиях действия противодействия на свободную поверхность заготовки. Моделирование проводили с помощью программного комплекса DEFORM, который был предоставлен на правах временной лицензии компанией «ТЕСИС». С помощью моделирования установлено необходимое максимальное противодействие, которое обеспечивает выдавливание без разрушения, усилие процесса, распределение напряжений

на деформирующем инструменте, напряжённо-деформированное состояние и степень использования ресурса пластичности металла, а также конечные размеры полученного изделия.

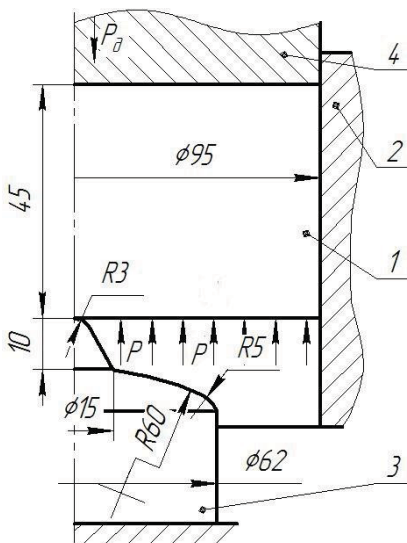


Рисунок 3. Схема выдавливания для моделирования МКЭ

на деформирующем инструменте, напряжённо-деформированное состояние и степень использования ресурса пластичности металла, а также конечные размеры полученного изделия. Процесс выдавливания полости матрицы сферическим пуансоном в заготовке из стали Р6М5 рассматривали как осесимметричную задачу. На рисунке 4 приведена схема для моделирования МКЭ выдавливания полости в условиях действия дифференцированного противодействия p на свободную поверхность заготовки с учетом уменьшения ее при выдавливании. Заготовку 1 устанавливают в контейнер 2 на мастер-пуансон 3. Усилие выдавливания P_0 прикладывают с помощью пуансона 4. Величина противодействия в процессе выдавливания переменная и зависит от усилия P_0 . Расчетная зависимость усилия выдавливания от перемещения пуансона показана на рисунке 4. Максимальное значение усилия в конце рабочего хода составило 6,91 МН. Расхождение результатов по максимальной величине усилия, рассчитанного по формуле (4), и МКЭ не превышает 8%. Изменение величины противодействия p от перемещения пуансона показано на рис 5. Максимальное значение противодействия в конце выдавливания составило 680 МПа, величина противодействия пропорционально зависит от усилия P_0 .

Распределение использованного ресурса пластичности ψ металла после деформации по объему заготовки показано на рисунке 6, максимальное значение составило $\psi = 0,8$. На рисунке 8 показано распределение интенсивности деформаций ϵ_i и интенсивности напряжений σ_i по объему деформированной заготовки с приложением противодействия.

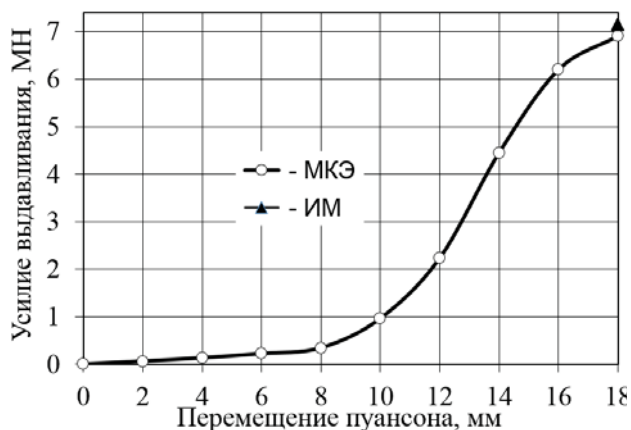


Рисунок 4. Зависимость усилия выдавливания от перемещения пуансона



Рисунок 5. Изменение противодействия при перемещении пуансона

По распределению интенсивности деформации ε_i (рисунок 8а) можно оценить проработку структуры металла холодной пластической деформацией.

Интенсивная проработка распространяется на треть заготовки по высоте. Тем самым создается улучшенная макроструктура в заготовке, что приводит к повышению стойкости полостей при эксплуатации. Распределение интенсивности напряжений σ_i (рисунок 8.б) определяет распространение очага деформации и величину упрочнения металла в заготовке. Очаг деформации распространяется на всю высоту по оси заготовки.

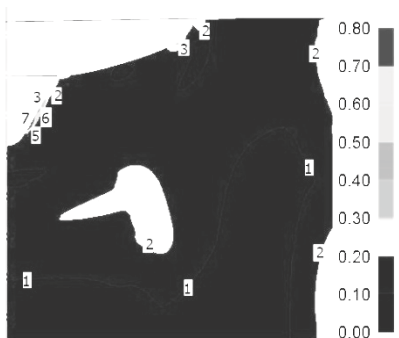
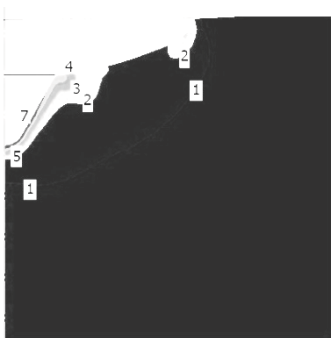
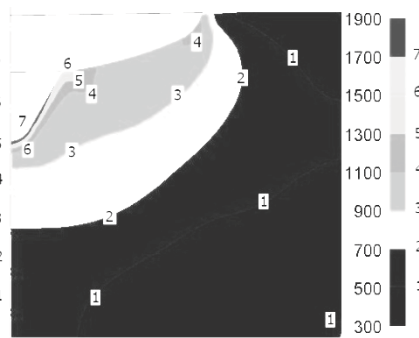


Рисунок 6. Распределение использованного ресурса пластичности ψ



а)



б)

Рисунок 7. Распределение интенсивности деформаций ε_i (а) и распределение интенсивности напряжений σ_i (б)

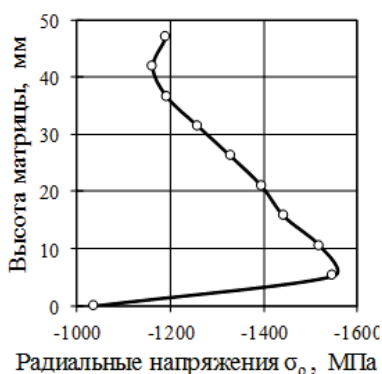


Рисунок 8. Распределение радиальных напряжений σ_r на контейнере

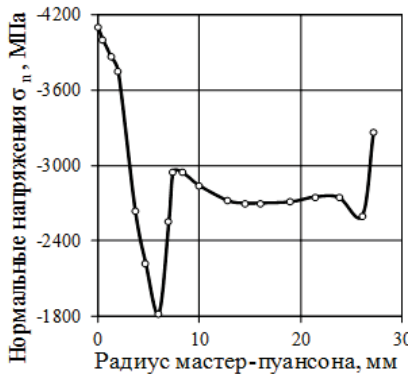


Рисунок 9. Распределение нормальных напряжений σ_n на мастер-пуансоне

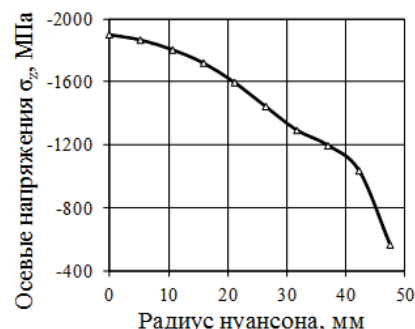


Рисунок 10. Распределение осевых напряжений σ_z на пуансоне



а)



б)

Рисунок 11. Мастер -пуансон (а) и заготовки после выдавливания (б)

Распределение радиальных напряжений σ_r по высоте поверхности заготовки, которая контактирует с контейнером, показано на рисунке 8. Максимальное значение радиальных напряжений по абсолютной величине на стенке матрицы составило 1550 МПа. На рисунке 9 приведено распределение нормальных напряжений σ_n по радиусу поверхности мастер-пуансона. Из характера распределения и геометрии пуансона (см. рисунок 4) видно, что на большинстве поверхности пуансона действуют напряжения $\sigma_n = -2700$ МПа. Распределение

осевых напряжений σ_z на пуансоне показано на рисунке 10, где максимальное значение по абсолютной величине на оси составило 1900 МПа. Распределение напряжений на рабочей поверхности инструмента позволяет выбрать материал для пуансонов и количество бандажей матрицы.

Было проведено экспериментальное исследование выдавливания полостей матриц в условиях действия противодействия на гидравлическом прессе ПО443 усилием 20 МН. На рисунке 11а показан мастер-пуансон. Заготовки полостей матриц из стали Р6М5, полученные ХВ с противодействием, приведены рисунке 11б.

Выводы

Инженерным методом с учетом трения и упрочнения получены зависимости для расчета напряжений на контактных поверхностях заготовки и инструмента, усилия выдавливания полостей сферическим пуансоном.

Компьютерным моделированием методом конечных элементов проведены численные эксперименты на примере выдавливания сферическим пуансоном полости в заготовке из стали Р6М5 в условиях действия противодействия. Установлено необходимое максимальное противодействие, которое обеспечивает выдавливание без разрушения, усилие процесса, распределение напряжений на деформирующем инструменте, напряженно-деформированное состояние и степень использования ресурса пластичности металла, а также конечные размеры полученных изделий.

Проведено экспериментальное выдавливание полостей сферическим пуансоном в заготовках из стали Р6М5.

Литература

1. Хыбемяги А.И. Выдавливание точных заготовок деталей штампов и пресс-форм / А.И Хыбемяги., П.С. Лернер; - М : Машиностроение, 1986. – 150 с.
2. Береснев Б. И. Некоторые вопросы больших пластических деформаций металлов при высоких давлениях / Б.И. Береснев, Л.Ф. Верещагин, Ю.Н. Рябинин и др. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 80 с.
3. Пью Х.Л. Механические свойства материалов под высоким давлением / Под ред. Пью Х.Л. Том 1. - М.: Изд-во «Мир», 1973. – 296 с.
4. Уральский В. И. Деформации металлов жидкостью высокого давления / В.И. Уральский, В.С. Плахотин, Н.И. Шефтель и др. - М.: Металлургия, 1976. – 423 с.
5. Белошенко В. А. Теория и практика гидроэкструзии./ В.А. Белошенко., В.Н. Варюхин, В.З. Спусканюк. - К.: Наукова думка, 2007. – 246 с.
6. Калюжный В.Л. Проблемы повышения стойкости чеканочных штемпелей // В.Л. Калюжный, В.А. Маковой, Н.П. Стародуб и др. //Обработка материалов давлением: сб. начн. Трудов, - Краматорск: ДГМА, 2008. - №1(19). С. – 316-323.
7. Калюжный В.Л. Холодное выдавливание ступенчатых полостей прессформ из стали 12ХНЗА в условиях действия дифференцированного противодействия на заготовку / В.Л. Калюжный, В.В. Пиманов //Вестник НТУ «ХПИ», Харьков. – 46'2011. С. – 34-41.
8. Степанский Л.Г. Расчёты процессов обработки металлов давлением. / Степанский Л.Г. - М: Машиностроение, 1979.– 215 с.
9. Сторожев М.В. Теория обработки металлов давлением. / М.В.Сторожев, Е.А Попов.- М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

Технология высадки детали с прямоугольной в плане головкой и радиусами закругления

Глазунов Д.А., Калпин Ю.Г. Филиппов Ю.К., Молодов А.В.
Университет машиностроения

Аннотация. Исследованию подвергается процесс высадки детали с прямоугольной в плане головкой. Проводится моделирование процессов комбинированной высадки прямоугольной головки болта. Для моделирования используется