

УДК 621.7

Калужный А.В. к.т.н.

НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЯ КОНИЧЕСКИМ ПУАНСОНОМ В ТОЛСТОЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВКАХ

Kaljuzhnyj A.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine ( [av-k@ukr.net](mailto:av-k@ukr.net) )

### ANALYSIS OF HOLES FORMING PROCESS BY CONICAL PUNCH IN THICK-SHEET WORKPIECES

В статье приведено решение приближенных уравнений равновесия с условием пластичности для анализа процесса выдавливания отверстия коническим пуансоном в листовых заготовках, используемого для профилирования исходных заготовок под последующую отбортовку. Получены аналитические зависимости для определения нормальных напряжений на контактных поверхностях и усилия выдавливания. В решении учтено упрочнение металла при формообразовании отверстия. Методом конечных элементов проведен численный эксперимент по выдавливанию отверстий в заготовках различной толщины. Выполнено сравнение численных результатов и данных по аналитическим зависимостям, что позволяет рекомендовать полученные выражения для инженерных расчетов параметров выдавливания.

*Ключевые слова:* отбортовка, метод конечных элементов, упрочнение, численный эксперимент.

Отбортовка отверстий в листовых заготовках и профилях – широко распространенная формообразующая операция листовой штамповки. Машиностроительные детали, полученные отбортовкой, часто используются для образования разъемных и неразъемных соединений в конструкциях с другими изделиями. При отбортовке отверстий в традиционной листовой заготовке или профиле имеет место утонение стенки и искривление сформированной части. Для устранения искривления и увеличения высоты сформированной части используют второй переход штамповки, который позволяет осуществить дальнейшее уменьшение толщины отбортованной стенки. Результирующее утонение приводит к снижению надежности и долговечности машиностроительных конструкций, которые состоят из разъемных и неразъемных соединений отбортованных деталей с другими изделиями.

При проектировании технологии отбортовки расчеты в основном сводятся к определению коэффициента отбортовки и усилия деформирования [1-3]. Вопросам прогнозирования и обеспечения качества изделий при отбортовке круглых отверстий в традиционной листовой заготовке посвящена работа [4]. Влияние геометрической формы пуансона на качество изделий при отбортовке круглых отверстий рассмотрено в источнике [5]. Для устранения дефектов в виде утонения и искривления стенки был предложен способ отбортовки отверстий [6]. Сущность способа состоит из последовательности операций, которая приведена на рис. 1. На первой операции (рис. 1а) в заготовке 1, установленной на плите 5 и зафиксированной прижимом 3, выполняется выдавливание отверстия коническим пуансоном 4 с образованием перемычки и утолщения на части заготовки. Угол боковой поверхности пуансона выбирают таким, чтобы торец изделия после отбортовки был ровным. На второй операции (рис. 1б) в спрофилированной заготовке, установленной на матрице 2, пуансоном 3 пробивают перемычку 4. На третьей операции в спрофилированной заготовке 1, размещенной на матрице 2, пуансоном 3 выполняют отбортовку (рис. 1в). В результате получают изделие 4 с толщиной стенки

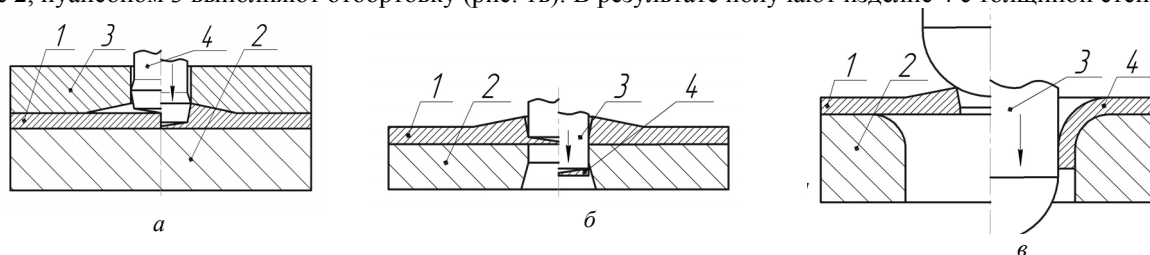


Рис. 1. Последовательность операций получения отбортовкой изделий с толщиной стенки, которая не меньше толщины исходной заготовки: а – образование отверстия и профилирование выдавливанием исходной заготовки; б – пробивка перемычки; в - отбортовка

не меньшей толщины исходной заготовки и с цилиндрической частью без искривления по высоте. Преимущества нового способа отбортовки, в сравнении с традиционным способом, приведены в работе [6]. Наибольшее усилие деформирования возникает при выполнении операции выдавливания.

Поэтому актуальной задачей является получение аналитических зависимостей для определения усилия формообразования отверстия и утолщения в исходной заготовке.

Целью работы является выполнение теоретического анализа выдавливания отверстия в листовых заготовках коническим пуансоном, получение аналитических зависимостей для определения напряжений на контактных поверхностях и усилия деформирования.

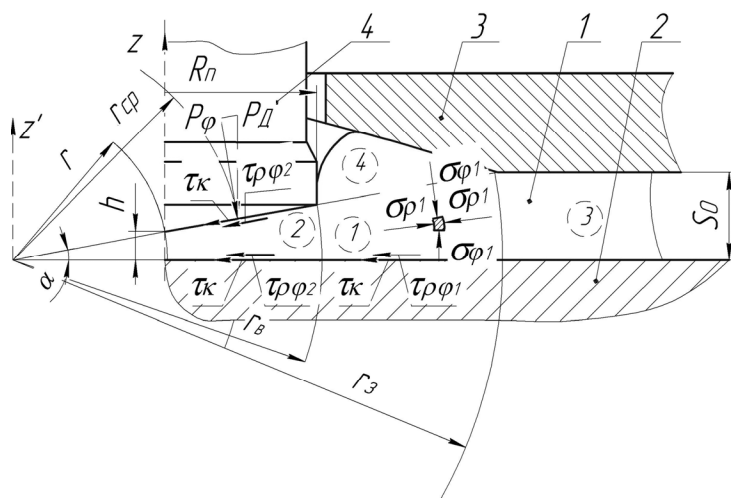


Рис. 2. Расчетная схема формообразования отверстия выдавливанием (1-заготовка, 2 – плита, 3 – прижим, 4-пуансон)

Анализ проведен методом совместного решения приближенных уравнений равновесия и условия пластичности (инженерным методом). Металл считался изотропным, жесткопластическим с упрочнением. Расчетная схема приведена на рис. 2 (в силу симметрии показана ее половина). Исходная заготовка 1 толщиной  $S_0$  размещена на плите 2 и зафиксирована прижимом 3. Выдавливание выполняют коническим пуансоном 4, который имеет радиус  $R_D$  и угол торца  $\alpha$ . В результате выдавливания образуется перемычка высотой  $h$ . Берем дополнительную ось  $z'$  и выделяем очаг деформации в заготовке, который ограничен радиусами  $r$  и  $r_6$ . Очаг деформации разделяем на два объема: первый объем расположен между радиусами  $r_6$  и  $r_3$ , второй – между  $r$  и  $r_6$ .

В 3 и 4 объемах металл не деформируется. Для анализа напряженного состояния в 1 и 2 объемах используем полярные координаты. Считаем, что в конечный момент выдавливания в указанных объемах имеет место плоскодеформированное состояние. Дифференциальное уравнение равновесия имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\varphi}{\rho} = 0 \quad (1)$$

Распределение касательных напряжений  $\tau_{\rho\varphi}$  в 1 и 2 объемах принимаем в виде:  $\tau_{\rho\varphi} = \tau_k (2\varphi / \alpha)$ . Тогда уравнение (1), если подставить формулу для  $\tau_{\rho\varphi}$ , будет в полных производных и может быть использовано для нахождения распределения напряжений  $\sigma_\varphi$  на контактных поверхностях и усилия деформирования  $P_D$ :

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{2\tau_k}{\alpha\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\varphi}{\rho} = 0 \quad (2)$$

Начинаем анализ с 1 объема. В нем возникают напряжения сжатия  $\sigma_{\rho 1}, \sigma_{\varphi 1}$ . На поверхности между 1 и 3 объемами действуют касательные напряжения сдвига  $\tau_{\rho\varphi 1} = \tau_3$ , а на поверхности плиты -  $\tau_{\rho\varphi 1} = \tau_k = \mu\sigma_{\varphi 1}$  (здесь  $\mu$  - коэффициент трения). Однако, касательными напряжениями в этом объеме из-за их малости можно пренебречь. Тогда уравнение равновесия имеет вид:

$$\frac{d\sigma_{\rho 1}}{d\rho} + \frac{\sigma_{\rho 1} - \sigma_{\varphi 1}}{\rho} = 0 \quad (3)$$

Записываем приближенное условие пластичности (с учетом, что  $|\sigma_{\rho 1}| > |\sigma_{\varphi 1}|$ ):

$$\sigma_{\rho 1} - \sigma_{\varphi 1} = -\sigma_s \quad (4)$$

После интегрирования (3) совместно с (4) и определения произвольной постоянной из условия при  $\rho = r_3$  напряжение  $\sigma_{\rho 1} = 0$  получаем:

$$\sigma_{\rho 1} = -\sigma_s \ln \frac{r_3}{\rho} \quad (5)$$

Максимальное напряжение  $\sigma_{\rho 1}^{\max}$  будет при  $\rho = r_6$ :

$$\sigma_{\rho 1}^{\max} = -\sigma_s \ln \frac{r_3}{r_6} \quad (6)$$

Переходим до анализа 2 объема. Принимаем  $\tau_k = \mu \sigma_{\varphi 2}$ , тогда уравнение равновесия (2) имеет вид:

$$\frac{d\sigma_{\rho 2}}{d\rho} + \frac{2\mu\sigma_{\varphi 2}}{\rho\alpha} + \frac{\sigma_{\rho 2} - \sigma_{\varphi 2}}{\rho} = 0 \quad (7)$$

Приближенное условие пластичности (с учетом, что  $|\sigma_{\varphi 2}| > |\sigma_{\theta 2}|$ ) записываем так:

$$\sigma_{\rho 2} - \sigma_{\varphi 2} = \sigma_s \quad (8)$$

Подставляя уравнение (8) в (7), после разделения переменных имеем:

$$\frac{d\sigma_{\rho 2}}{\frac{2\mu}{\alpha}\sigma_{\rho 2} + \sigma_s \left(1 - \frac{2\mu}{\alpha}\right)} = -\frac{d\rho}{\rho} \quad (9)$$

После интегрирования (9) и определения произвольной постоянной из условия, что при  $\rho = r_6$  радиальные напряжения  $\sigma_{\rho 2} = \sigma_{\rho 1}^{\max}$  по уравнению (6), получаем:

$$\sigma_{\rho 2} = -\sigma_s \left[ \left( \ln \frac{r_3}{r_6} + 1 - \frac{\alpha}{2\mu} \right) \left( \frac{r_6}{\rho} \right)^{\frac{2\mu}{\alpha}} + \frac{\alpha}{2\mu} - 1 \right] \quad (10)$$

Из условия пластичности (8) находим выражение для напряжения  $\sigma_{\varphi 2}$ :

$$\sigma_{\varphi 2} = -\sigma_s \left[ \left( \ln \frac{r_3}{r_6} + 1 - \frac{\alpha}{2\mu} \right) \left( \frac{r_6}{\rho} \right)^{\frac{42\mu}{\alpha}} + \frac{\alpha}{2\mu} \right] \quad (11)$$

Напряжения  $\sigma_{\varphi 2}$  зависят от радиуса  $\rho$ . Для расчета усилия выдавливания определим среднее значение напряжения  $\sigma_{\varphi 2}$  на радиусе на  $r_{cp}$  торца пуансона (см. рис. 2):

$$\sigma_{\varphi 2}^{cp} = (\sigma_{\varphi 2, \text{при } \rho=r} + \sigma_{\varphi 2, \text{при } \rho=r_6}) / 2 = -\sigma_s \left\{ \left( 0,5 \ln \frac{r_3}{r_6} + \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{4\mu} \right) \left[ \left( \frac{r_6}{r} \right)^{\frac{2\mu}{\alpha}} + 1 \right] + \frac{\alpha}{2\mu} \right\} \quad (12)$$

Тогда вертикальная составляющая усилия выдавливания  $P_{\text{Д}}$  на торце пуансона от напряжения  $\sigma_{\varphi 2}^{cp}$  будет иметь вид:

$$P_{\text{Д}} = P_{\varphi} / \cos \alpha = \left| \sigma_{\varphi 2}^{cp} \right| F / \cos \alpha,$$

где:  $F$  - площадь боковой поверхности торца пуансона. Тогда, с учетом (16) и величины  $\pi \approx 3,14$ , конечное выражение для усилия имеет вид:

$$P_{\text{Д}} = 3,14 R_{\text{II}}^2 \sigma_s \left\{ \left( 0,5 \ln \frac{r_3}{r_6} + \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{4\mu} \right) \left[ \left( \frac{r_6}{r} \right)^{\frac{2\mu}{\alpha}} + 1 \right] + \frac{\alpha}{2\mu} \right\} / \cos^2 \alpha \quad (13)$$

Радиусы  $r$ ,  $r_6$  и  $r_3$  можно выразить через размеры исходной заготовки, высоту перемычки  $h$  и пуансона  $R_{\text{II}}$  (см. рис. 2):

$$r = \frac{h}{\sin \alpha} \approx \frac{h}{\alpha}; r_6 = r + \frac{R_{\text{II}}}{\cos \alpha} \approx \frac{h}{\alpha} + R_{\text{II}}; r_3 = \frac{So}{\sin \alpha} \approx \frac{So}{\alpha} \quad (14)$$

Тогда усилие выдавливания, с учетом величины  $\cos^2 \alpha \approx 1$  для углов пуансона  $\alpha = 3^\circ \div 5^\circ$ , можно определить по формуле:

$$P_D = 3,14R_{II}^2\sigma_s \left\{ \left( 0,5 \ln \frac{S_0}{h + \alpha R_{II}} + \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{4\mu} \right) \left[ \left( \frac{h + \alpha R_{II}}{h} \right)^{\frac{2\mu}{\alpha}} + 1 \right] + \frac{\alpha}{2\mu} \right\} \quad (15)$$

При получении выражений для напряжений и усилия не учтено упрочнение металла при выдавливании. Для учета упрочнения используем известную аппроксимацию диаграммы истинных напряжений:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_6}{1 - \psi_{ш}} \left( \frac{\psi}{\psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}}, \quad (16)$$

где:  $\sigma_6$  - предел прочности,  $\psi$  - относительное сужение при испытании на растяжении,  $\psi_{ш}$  - относительное сужение, соответствующее образованию шейки на образце. В качестве относительного утонения  $\psi$  при выдавливании можно взять следующую величину:

$$\psi = \frac{r_3\alpha - r\alpha}{r_3\alpha}, \quad (17)$$

где  $r_3\alpha$  - начальная длина дуги в очаге деформации,  $r\alpha$  - длина дуги на произвольном радиусе  $r$ . Для определения усилия  $P_D$  необходимо установить величину  $\psi$  на радиусе  $r = r_{cp}$ . С геометрических соотношений (см. рис. 2) имеем:

$$\psi = \frac{r_3\alpha - r_{cp}\alpha}{r_3\alpha} = \frac{r_3 - r_{cp}}{r_3} = \frac{S_0 - h - 0,5R_{II}\alpha}{S_0} \quad (18)$$

Тогда формула (16) преобразуется к виду:

$$\sigma_s^{cp} = \frac{\sigma_6}{1 - \psi_{ш}} \left( \frac{S_0 - h - 0,5R_{II}\alpha}{S_0\psi_{ш}} \right)^{\frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}} \quad (19)$$

Для проверки результатов расчетов по полученным аналитическим зависимостям был проведен численный эксперимент с использованием метода конечных элементов (МКЭ) выдавливания. Расчетная схема для моделирования МКЭ процесса формообразования отверстия выдавливанием коническим пуансоном приведена на рис. 3. Задача осесимметричная, показано половину исходной заготовки 1 толщиной  $S_0$  и диаметром  $D_3=2R_3$ , которая установлена на плите 2 и фиксируется прижимом 3. Усилие выдавливания  $P_D$  приложено при помощи пуансона 4 диаметром  $D_{II}=2R_{II}$  и углом  $\alpha$ . В результате выдавливания необходимо получить спрофилированную заготовку для последующей отбортовки: толщина профиля  $S_{пр}$  с уменьшением до величины  $S_0$  на диаметре  $D_{II}=2R_{II}$ . Моделирование проведено для выдавливания отверстий в заготовках с малоуглеродистой стали (условный предел текучести  $\sigma_{0,2}=280$  МПа) диаметром  $D_3=160$  миллиметров (мм) и толщинами  $S_0=1,5; 2; 3$  и 4 мм. Относительные толщины  $\delta=(S/D_3)100$  % соответственно составляют 7,5; 10; 15 и 20 %. Размеры пуансона:  $D_{II}=20$  мм,  $r=0,5$ ,  $\alpha=3^\circ$ ; прижима:  $S_{II}=S_0+1,2$  мм,  $D_{II}=38$  мм. Коэффициент трения принят  $\mu=0,08$ . Для получения спрофилированной заготовки для указанных размеров инструмента перемещения пуансона составило 1,2 мм.

Как показали расчеты, при отсутствии прижима имеет место отставание заготовки от плиты, что показано на рис. 4 для выдавливания заготовки с  $\delta=7,5$  %. Наличие прижима исключает отставание заготовки и обеспечивает формообразование необходимого профиля заготовки под последующую отбортовку.

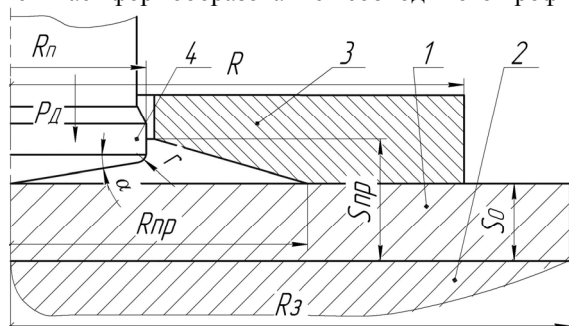


Рис. 3. Расчетная схема выдавливания для моделирования МКЭ

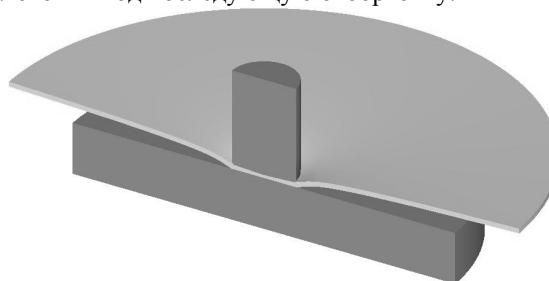


Рис. 4. Отставание заготовки от плиты при выдавливании без прижима

Для  $\delta=7,5$  % при выдавливании сначала имеет место искривление заготовки, а потом выполняется формование профиля путем заполнения полости между прижимом и плитой (рис. 5).

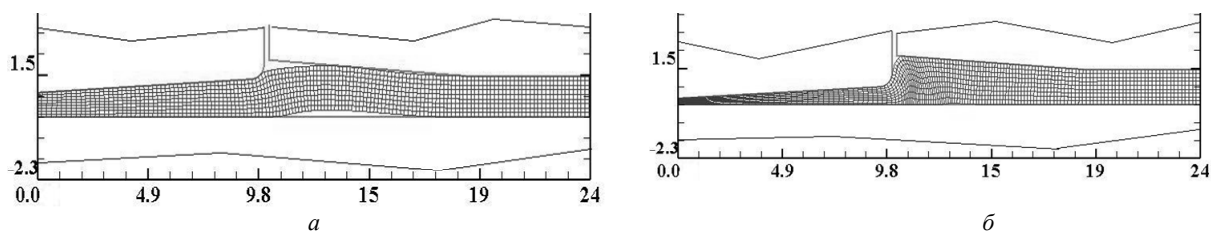


Рис. 5. Стадії выдавливання: а- искривлення заготовки, б- формировање профіля. Розміри по осях в міліметрах

Зависимости усилия выдавливания от перемещения пуансона приведены на рис. 6. С увеличением относительной толщины заготовки усилие выдавливания уменьшается, что связано с снижением влияния сил трения на контактных поверхностях заготовки. Для выдавливания заготовки с  $\delta=10\%$  приведено значение усилие (590 кН), которое рассчитано по формулам (15) и (19) для конечной стадии выдавливания. Различие результатов с данными по МКЭ (540 кН) составило 8,5 %. На рис. 7 показаны распределения нормальных напряжений по радиусу пуансона, которые получены МКЭ та абсолютные значения напряжений, рассчитанные по выражению (11). Сравнение величины напряжения по МКЭ (2050 МПа) и среднего значения (1950 МПа), полученного по формуле (16) для середины торца пуансона, дает расхождение 4,9 %.

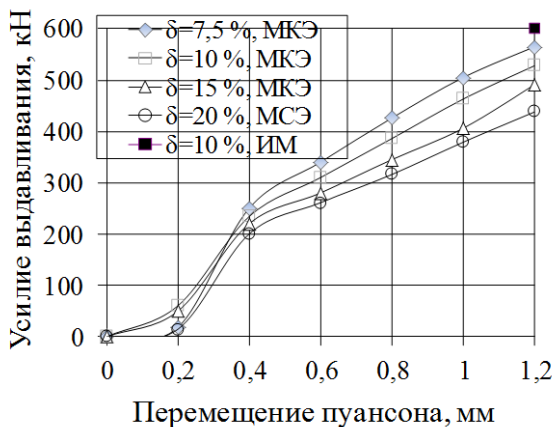


Рис. 6. Зависимости усилия выдавливания от перемещения пуансона

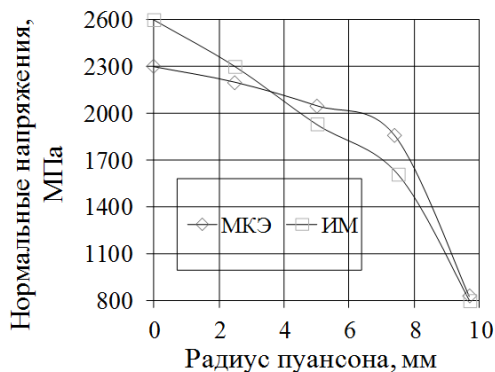


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений по радиусу пуансона

Для проектирования штамповой оснастки для выдавливания необходимо иметь данные по усилию, которое воспринимает прижим при формообразовании отверстия. Для примера, на рис. 8 приведена зависимость усилия на прижиме от перемещения пуансона при выдавливании отверстия в заготовке с  $\delta=10\%$ .

Размеры очага деформации в заготовке и величину упрочнения сформированного металла можно оценить по распределению интенсивности напряжений  $\sigma_i$ . На рис. 9 приведено указанное распределение при выдавливании отверстия в заготовке с  $\delta=10\%$ . Очаг деформации распространяется до радиуса  $R_{пр}$ , что соответствует радиусу  $r_3$  на расчетной схеме (см. рис. 2). В объеме металла, который расположен в перемычке, приведены величины напряжений  $\sigma_i$  по МКЭ и в скобках показаны данные, рассчитанные по формулам (16) и (17).

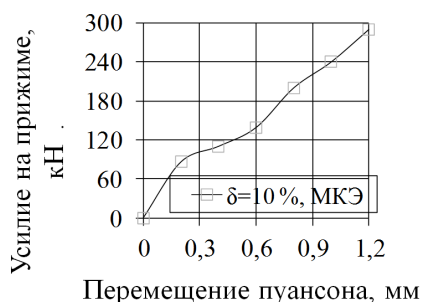


Рис. 8. Зависимость усилия на прижиме от перемещения пуансона

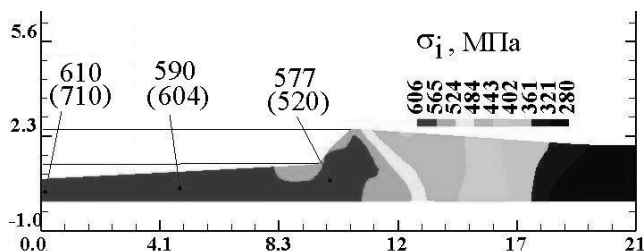


Рис. 9. Распределение интенсивности напряжений  $\sigma_i$  в сформированной части заготовки с  $\delta=10\%$

## Выводы

Методом совместного решения приближенных уравнений равновесия с условием пластичности проведен анализ процесса выдавливания отверстия коническим пуансоном в листовых заготовках, который используют для профилирования исходных заготовок под последующую отбортовку. Получены аналитические зависимости для определения нормальных напряжений на контактных поверхностях и усилия выдавливания. В решении учтено упрочнение металла при формообразовании отверстия. Методом конечных элементов проведен численный эксперимент по выдавливанию отверстий в заготовках различной толщины из малоуглеродистой стали. Выполнено сравнение численных результатов и данных по аналитическим зависимостям, что позволяет рекомендовать полученные выражения для инженерных расчетов параметров выдавливания.

**Анотація.** У статті наведено рішення наближених рівнянь рівноваги з умовою пластичності для аналізу процесу видавлювання отвору конічним пуансоном в листових заготовках, використовуваного для профілювання вихідних заготовок під подальше відборткування. Отримано аналітичні залежності для визначення нормальних напружень на контактних поверхнях і зусилля видавлювання. У рішенні враховано зміцнення металу при формоутворенні отвори. Методом скінчених елементів проведено чисельний експеримент з видавлювання отворів в заготовках різної товщини. Виконано порівняння чисельних результатів і даних за аналітичними залежностями, що дозволяє рекомендувати отримані вирази для інженерних розрахунків параметрів видавлювання.

**Ключові слова:** відборткування, метод скінчених елементів, зміцнення, чисельний експеримент.

**Abstract. Purpose.** The aim is to perform a theoretical analysis of extrusion holes in the sheet blanks by conical punch, getting analytical relations for the determination of stresses on the contact surfaces and the deforming force.

**Design/methodology/approach.** Analysis was performed by co-decision approximate equilibrium equations and the plasticity condition (engineering method). Metal considered isotropic, rigid-hardening. To check the results of calculations obtained by the analytic dependence was conducted numerical experiments using the finite element method (FEM) extrusion.

**Findings.** With the increase in the relative thickness of the preform extrusion force decreases due to the decrease of the friction forces on the contact surfaces of the workpiece. Difference between the results with data on FEM (540 kN) was 8.5%. For designing the extrusion die tooling necessary to have data on the effort that perceives clamp in forming holes.

Dimensions deformation zone in the workpiece and the value of hardening of the deformed metal can be estimated from the distribution of the stress intensity  $\sigma_i$ . **Originality/value.** By joint decision of the approximate equations of equilibrium with the condition of plasticity analysis of extrusion processes conical punch holes in the slab which is used for profiling source billets for subsequent flare. Analytical dependences to determine the normal stress on the contact surfaces and the efforts of the extrusion.

**Keywords:** flanging, finite element method, strengthening numerical experiment

## Библиографический список использованной литературы

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке / – 6-е изд., пераб. и доп. // В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Аверкиев Ю.А. Холодная штамповка// Ю.А.Аверкиев. Издательство Ростовского университета, 1984. - 288 с.
3. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4 Листовая штамповка/ Под ред.. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985-1987. – 544 с.
4. Калюжный А.В. Прогнозирование та обеспечение качества изделий в процессах отбортовки / А.В. Калюжный // Вестник Национального технического университета «ХПИ». - Харьков; 32\*2009 р. - С. 118 — 122.
5. Калюжный А.В. Анализ силовых режимов и качества изделий при отбортовке пуансонами различной геометрической формы / А.В. Калюжный, С.М. Пахолко// Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение, № 63, 2011. - С. 123-127.
6. Патент 69344 Украина, МПК(2012) В21D 26/02. Способ отбортовки отверстий / Калюжный А.В., Пахолко С.А., Куликов. И.П., № u201112215; Заявл. 18.10.2011, опубл.25.04.2012, Бюл. №8/2012.
7. Калюжный А.В. Влияние коэффициента отбортовки на силовые режимы и качество изделий при отбортовке круглых отверстий в традиционной и спрофилированной листовой заготовке // А.В. Калюжный// Вестник Национального технического университета «ХПИ», № 46, 2012. - С. 56-63.
8. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки / Е.А. Попов. - М: Машиностроение, 1977. – 278 с.

## References

1. Romanovskij V.P. Spravochnik po holodnoj shtampovke, 6-e izd., perab. i dop. Leningrad: Mashinostroenie, 1979. 520 p.
2. Averkijev Ju.A. Holodnaja shtampovka. Izdatel'stvo Rostovskogo universiteta, 1984. 288 p.
3. Kovka i shtampovka: Spravochnik: V 4 t. T. 4 Listovaja shtampovka Pod red. A.D. Matveeva; Red. sovet: E.I. Semenov (pred.) i dr. Moskow.: Mashinostroenie, 1985-1987. 544 p.
4. Kaljuzhnyj A.V. Prognozirovanie ta obespechenie kachestva izdelij v procesah otbortovki Vestnik Nacional'nogo tehniceskogo universiteta «HPI». Har'kov; 32\*2009 r. p. 118 — 122.
5. Kaljuzhnyj A.V. S.M. Paholko Journal of Mechanical Engineering of NTUU «KPI», no 63, 2011. p. 123-127.
6. Patent 69344 Ukraina, MPK(2012) V21D 26/02. Sposob otbortovki otverstij Kaljuzhnyj A.V., Paholko S.A., Kulikov. I.P., no u201112215; Zajavl. 18.10.2011, opubl.25.04.2012, Bjul. No 8/2012.
7. Kaljuzhnyj A.V. Vlijanie koeficienta otbortovki na silovye rezhimy i kachestvo izdelij pri otbortovke kruglyh otverstij v tradicionnoj i sprofilirovannoj listovoj zagotovke. Vestnik Nacional'nogo tehniceskogo universiteta «HPI», no 46, 2012. p. 56-63.
8. Popov E.A. Osnovy teorii listovoj shtampovk. Moskva: Mashinostroenie, 1977. 278 p.

Подана до редакції 22.05.2014