

Алиева Л.И., Мартынов С.В., Жбанков Я.Г., Гончарук К.В.

## СИЛОВОЙ РЕЖИМ РАДИАЛЬНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ВНУТРЕННЕГО ФЛАНЦА

Aliieva L.I., Martynov S.V., Zhbankov J.G., Goncharuk K. V.

### THE POWER MODE AT RADIAL EXTRUSION OF THE INTERNAL FLANGE

*Представлены результаты моделирования процесса радиального центро-стремительного выдавливания втулок с внутренним фланцем методом конечных элементов при помощи программного продукта QForm 2D. Методом планирования эксперимента были получены зависимости приведенного давления, давления и усилия выдавливания и раскрытия оправки от геометрических параметров получаемой детали и величины степени деформации.*

**Ключевые слова:** выдавливание, метод конечных элементов, давление, трение.

#### **Введение**

Для получения деталей типа втулок с внутренним фланцем используют наряду с традиционными методами обработки металлов, такими как литье, механообработка, горячая объемная штамповка, способы точной объемной штамповки выдавливанием. Выдавливание позволяет получать детали, требующие минимальной обработки резанием, а иногда и полностью исключает применение последней [1,2]. При этом повышается коэффициент использования металла, улучшается качество поверхности и прочностные характеристики детали [2-4]. При этом наблюдается нехватка рекомендаций для определения силового режима выдавливания трубчатых деталей с внутренним фланцем.

#### **Цель**

Целью данного исследования является определение приведенного давления, давления и усилия выдавливания и раскрытия оправки при радиальном выдавливании внутренних фланцев (рис. 1).

#### **Методика исследования**

Планирование эксперимента позволяет не только получить коэффициенты уравнения регрессии, но и произвести статистическую обработку полученных экспериментальных данных и их оптимизацию [5].

В результате планирования эксперимента ожидается получить зависимости приведенного давления, давления и усилия выдавливания и раскрытия оправки от геометрических параметров получаемой детали (относительный внутренний радиус, относительная высота фланца) и величины степени деформации. Зависимой величиной (откликом), в данном случае, будут являться приведенное давление, давление и усилие выдавливания и раскрытия оправки.

Факторами, влияющими на величину приведенного давления, давления и усилия выдавливания и раскрытия оправки выбраны относительный радиус оправки ( $\bar{R} = \frac{R}{R_1}$ ), относительная высота фланца ( $\bar{h} = \frac{h}{R_1}$ ) и степень деформации ( $e$ ). Таким образом, исследуется трехфакторная модель. Изменение факторов будем вести на трех уровнях [6]. Первым этапом планирования является выбор центра плана  $X_{i_0}$  и определение шагов варьирования  $\Delta X_i$  по каждому фактору. Интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе на основном, верхнем и нижнем уровнях указаны в таблице уровней факторов (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Уровни факторов

Факторы	$X_1$ ( $\bar{h}$ )	$X_2$ ( $e$ )	$X_3$ ( $R$ )
Основной уровень ( $X_{i_0}$ )	0.178	0.6	0.8
Интервал варьирования ( $\Delta X_i$ )	0.089	0.3	0.022
Верхний уровень ( $x_i = 1$ )	0.267	0.9	0.822
Нижний уровень ( $x_i = -1$ )	0.089	0.3	0.778

Кодированные значения факторов ( $x_i$ ) связаны с натуральными значениями ( $X_i$ ) следующим соотношением (1):

$$x_i = (X_i - X_{i_0}) / \Delta X_i, \quad (1)$$

где  $X_{i_0}$  – натуральное значение основного уровня;

$\Delta X_i$  – интервал варьирования;

$i$  – номер фактора.

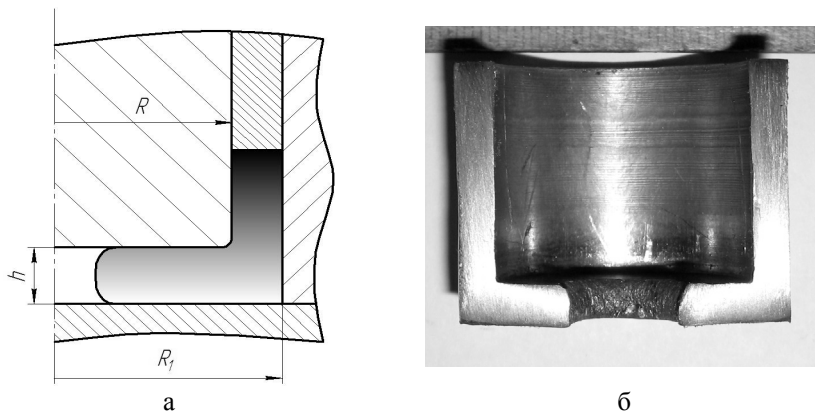


Рис. 1. Схема радиального центрирующего выдавливания - а, втулка с внутренним фланцем - б

Предполагается использование полно факторного эксперимента с надстройкой плана. Для планов типа  $B_k$  коэффициенты регрессионного уравнения можно определить по следующим формулам (2-5):

$$b_0 = C_1 \sum_{u=1}^N y_u - C_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u \quad (2)$$

$$b_i = C_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u \quad (3)$$

$$b_{ij} = C_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u \quad (4)$$

$$b_{ii} = C_5 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + C_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - C_2 \sum_{u=1}^N y_u \quad (5)$$

где  $C_1, C_2, \dots, C_6$  – вспомогательные константы;

$y_u$  – значение отклика в  $u$ -ом опыте;

$x_{iu}$  – значение  $i$ -го фактора в  $u$ -м опыте.

Согласно расширенной матрице плана производилось 14 экспериментов с различными параметрами процесса. Моделирование радиального центрирующего выдавливания производилось при помощи метода конечных элементов в программном продукте QForm 2D (рис. 2).

Уравнение регрессии в общем виде может быть представлено формулой (6), уравнение для приведенного давления деформирования и раскрытия оправки формулами (7-8):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i + \sum_{i=1}^{14} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i^2 = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_{\text{радиальное}} = & 2.01 - 0.402 \cdot \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} + 0.645 \cdot \frac{e - 0.6}{0.3} - 0.342 \cdot \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} - \\ & - 0.145 \cdot \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} \cdot \frac{e - 0.6}{0.3} + 0.088 \cdot \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} \cdot \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} - \\ & - 0.34 \cdot \frac{e - 0.6}{0.3} \cdot \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} + 0.311 \cdot \left( \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} \right)^2 + 0.36 \cdot \left( \frac{e - 0.6}{0.3} \right)^2 + \\ & + 0.097 \cdot \left( \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} \right)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнение регрессии в общем виде может быть представлено формулой (6), уравнение для приведенного давления деформирования и раскрытия оправки формулами (7-8):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i + \sum_{i=1}^{14} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i^2 = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \quad (6)$$

Уравнение регрессии в общем виде может быть представлено формулой (6), уравнение для приведенного давления деформирования и раскрытия оправки формулами (7-8):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i + \sum_{i=1}^{14} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i^2 = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \quad (6)$$

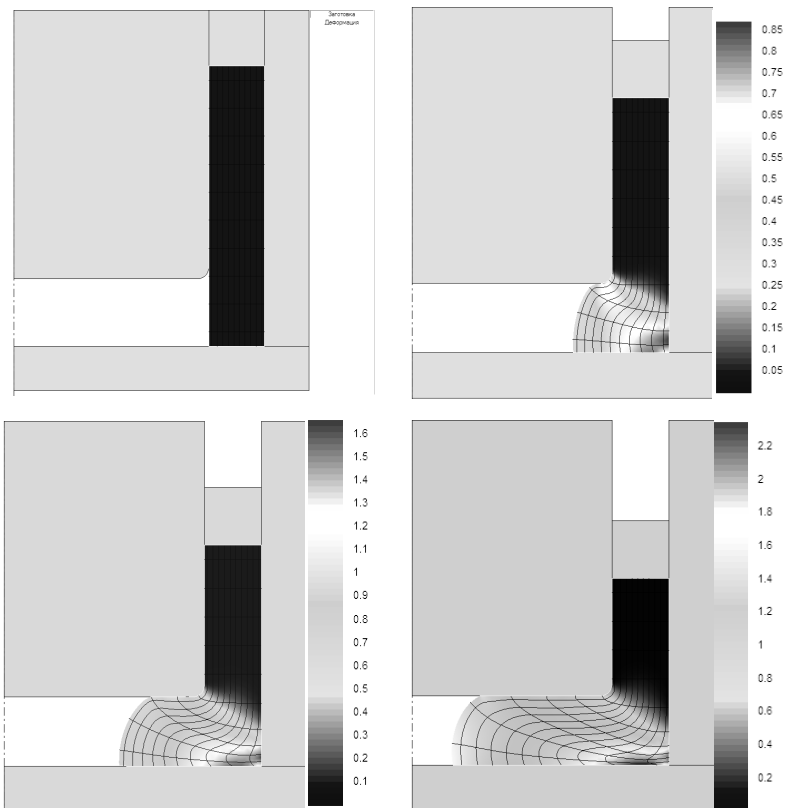


Рис. 2. Картины поэтапного формоизменения заготовки при радиальном центростремительном выдавливании

$$\begin{aligned}
 \bar{p}_{\text{радиальное}} = & 2.01 - 0.402 \cdot \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} + 0.645 \cdot \frac{e - 0.6}{0.3} - 0.342 \cdot \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} - \\
 & - 0.145 \cdot \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} \cdot \frac{e - 0.6}{0.3} + 0.088 \cdot \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} \cdot \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} - \\
 & - 0.34 \cdot \frac{e - 0.6}{0.3} \cdot \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} + 0.311 \cdot \left( \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} \right)^2 + 0.36 \cdot \left( \frac{e - 0.6}{0.3} \right)^2 + \\
 & + 0.097 \cdot \left( \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} \right)^2.
 \end{aligned} \tag{7}$$

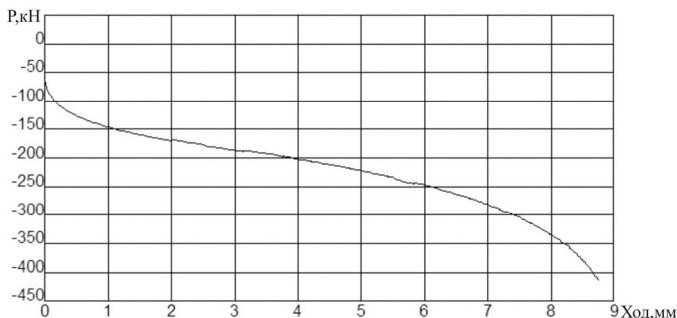
$$\begin{aligned}
\bar{p}_{\text{раcкpытне}}^{\text{радиальное}} = & 0.214 - 0.113 \cdot \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} + 0.396 \cdot \frac{e - 0.6}{0.3} - 0.158 \cdot \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} - \\
& - 0.059 \cdot \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} \cdot \frac{e - 0.6}{0.3} + 7.77 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} \cdot \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} - \\
& - 0.181 \cdot \frac{e - 0.6}{0.3} \cdot \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} + 0.058 \cdot \left( \frac{\bar{h} - 0.178}{0.089} \right)^2 + 0.22 \cdot \left( \frac{e - 0.6}{0.3} \right)^2 + \\
& + 0.05 \cdot \left( \frac{\bar{R} - 0.8}{0.022} \right)^2.
\end{aligned} \tag{8}$$

Граничные условия для осесимметричной задачи были заданы в следующем виде: упрочнение алюминиевого материала АД31 описано кривой упрочнения  $\sigma_s = 191.55 \cdot e^{0.202} \text{ МПа}$  при скорости деформирования  $0,25 \text{ с}^{-1}$ , которая была получена по экспериментальным данным, плотность материала  $2800 \text{ кг/м}^3$ ; модуль Юнга  $71000 \text{ МПа}$ ; коэффициент Пуассона  $0,3$ ; коэффициент трения по Леванову  $\mu_s = 0,16$ ; скорость перемещения инструмента  $1 \text{ мм/с}$ ; инструмент абсолютно жесткий.

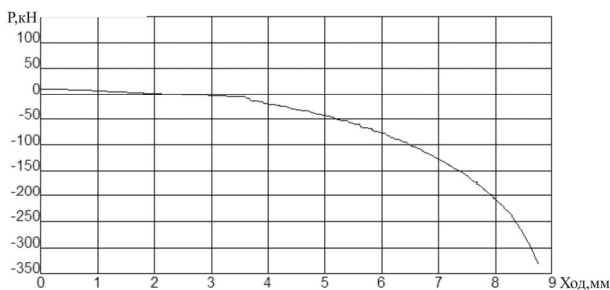
### Результаты исследований

В соответствии с проведенным моделированием в пакете QForm, было установлено (рис. 2), что очаг деформации имеет параболический характер; очаг деформации по высоте равняется высоте фланца; максимальное значение деформации возле наружной стенки у нижнего торца фланца и у переходной кромки фланца (радиус закругления оправки). На начальной стадии процесса, когда заготовка имеет наибольшую высоту и площадь контакта с оправкой, силы трения заготовки об оправку приводят к тому, что усилие раскрытия получается положительным (рис. 3, б), т.е. направлено в направлении движения пуансона. После того как начинается заполнения поперечной полости, замечен рост усилия раскрытия с изменением знака, т.е. оправка «раскрывается» в противоположном направлении движению пуансона. Это связано с увеличением значения сжимающих окружных напряжений (стремление фланца увеличится по высоте), с увеличением площади контакта металла с торцом оправки, а также с упрочнением металла.

С использованием методики, описанной ранее, при помощи программы MathCAD были получены зависимости приведенного давления, давления, усилия выдавливания (а) и раскрытия оправки (б) от степени деформации (рис. 4), относительной высоты фланца (рис. 5) при различных параметрах процесса.



а



б

Рис. 3. Графики зависимости усилия выдавливания - а и усилия раскрытия оправки - б от хода

Из графиков, представленных на рис. 4 видно, что с увеличением степени деформации приведенное давление, давление и усилие выдавливания (а) и раскрытия оправки (б) увеличивается. Увеличение относительного радиуса оправки ( $\bar{R}$ ) способствует уменьшению приведенного давления, давления и усилия выдавливания и раскрытия оправки.

Из графиков, представленных на рис. 5 видно, что с увеличением относительной высоты фланца ( $\bar{h}$ ) до 0.23 наблюдается уменьшение приведенного давления, давления и усилия выдавливания (а) и раскрытия оправки (б), а при дальнейшем увеличении  $\bar{h}$  до 0.267 – рост. С увеличением относительного радиуса оправки ( $\bar{R}$ ) приведенное давление, давление и усилие выдавливания (а) и раскрытия оправки (б) уменьшается.

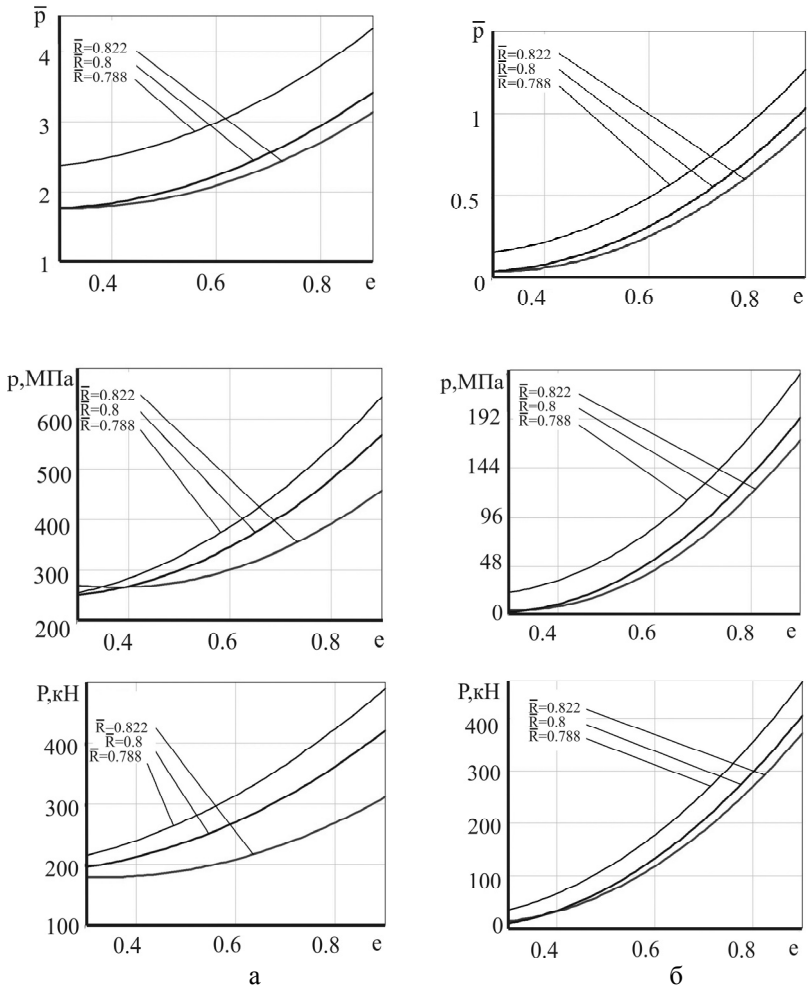


Рис. 4. Графики зависимости приведенного давления, давления и усилия выдавливания - а и раскрытия оправки - б от степени деформации при различных относительных радиусах оправки



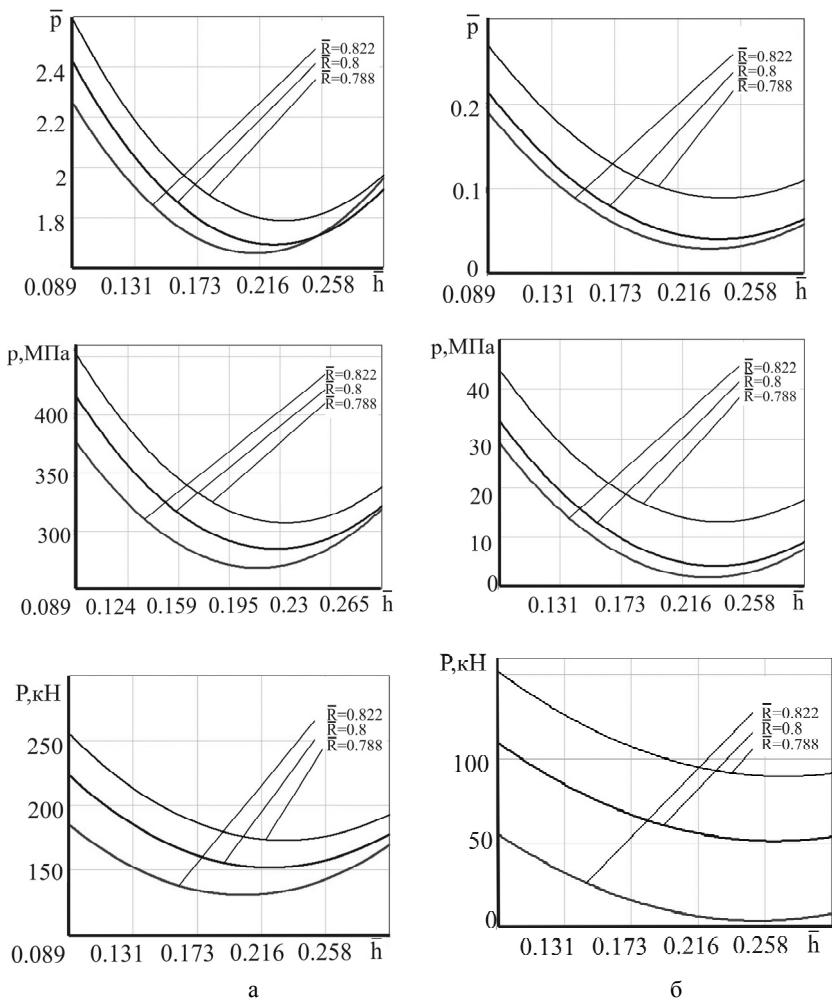


Рис. 5. Графики зависимости приведенного давления, давления и усилия выдавливания - а и раскрытия оправки – б от относительной высоты фланца при различных относительных радиусах оправки

### Выводы

Проведено моделирование процесса радиального центробежного выдавливания втулок с внутренним фланцем методом конечных элементов при помощи программного продукта QForm 2D. Были определены форма и размеры очага деформации. Методом планирования эксперимента были получены зависимости приведенного давления, давления и усилия

выдавливания и раскрытия оправки от геометрических параметров получаемой детали и величины степени деформации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алиева Л.И. Характеристика формоизменения металла при выдавливании / Л.И. Алиева, Р.С. Борисов, Е.Л. Скрипниченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні, 2003. – С. 340 – 345.
2. Соколов Л.Н. Новые малоотходные способы выдавливания / Л.Н. Соколов, Л.И. Алиева, С.В. Мартынов // Збірник тез доповідей IV науково-технічної конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» - Краматорськ: ДДМА. – 2006. – С. 94.
3. Алиева Л.И. Формообразование утолщений на полах и сплошных заготовках / Л.И. Алиева, Р.С. Борисов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні, 2004. – С. 51 – 57.
4. Алиев И.С. Формообразование фланцев при холодном выдавливании осесимметричных деталей / И.С. Алиев, Л.И. Алиева, С.В. Мартынов, И.Г. Савчинский // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА. – 2007. – С. 221 – 225.
5. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методом планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов // Машстроение. – 1980. – 304 с.
6. Жбанков Я.Г. Получение полых деталей с переменной толщиной стенки на базе использования способов радиально-прямого выдавливания: дис. ... кандидата тех. наук: 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением / Жбанков Ярослав Геннадьевич. – Краматорск: ДГМА, 2010. – 284 с.

## REFERENCES

1. Aliieva L.I. Charakteristika formoizmenenija metalla pri vudavlivanii / L.I. Aliieva, R.S. Borisov, E.L. Skripnichenko // Udoskonallennja protcesiv obrobku tuskom v metallurgii i machunobydyvanni, 2003. – pp. 340 – 345.
2. Sokolov L.N. Novue maloohodnue sposobu vudavlivanija, L.N Sokolov, L.I. Aliieva, S.V. Martynov // Zbirnuk tez dopovidey IV naukovo-tehnichnoi koferentcii “Vagke machunobydyvanija. Problemy ta perspektivy pozvtuku” - Kramatorsk: DDMA. - 2006. p. 94.
3. Aliieva L.I. Formoobrazovanie utolcheniy na poluch i splochnuch zagotovkach / L.I. Aliieva, R.S. Borisov // Udoskonallennja protcesiv obrobku tuskom v metallurgii i machunobydyvanni. 2004. – P. 51 – 57.
4. Aliiev I.S. Formoobrazovanie flantcev pri choldnom vudavlivanii osecimmetrihnych detaley / I.S. Aliiev, L.I. Aliieva, S.V. Martynov, I.G. Savchinskiy // Udoskonallennja protcesiv obrobku tuskom v metallurgii i machunobydyvanni: Zb. nauk. pr. - Kramatorsk: DDMA. – 2007. – pp. 221 – 225.
5. Novik F.S. Optimizacija protcessov tehnologii metallov metodom planirovanija eksperimentov / F.S. Novik, J.B. Arsov // Machunostroenie. – 1980. – 304 p.
6. Zhbankov J.G. Poluchenie poluh detaley s peremennoy tolchinoy stenki na baze ispolzovanija sposobov radialno-prjamogo vudavlivanija: dis. kandidata teh. nauk. 05.03.05 – Protcessu i machunu obrabotki davleniem / Zhbankov Jaroslav Gennadievich. - Kramatorsk: DDMA. 2010. – 284 p.

**Алієва Л.І., Мартинов С.В., Жбанков Я.Г., Гончарук Х.В. Силовий режим радіального видавлювання внутрішнього фланця.**

Проведено моделювання процесу радіального доцентрового видавлювання втулок із внутрішнім фланцем методом скінчених елементів за допомогою програмного продукту QForm 2D. Методом планування експерименту були отримані залежності приведенного тиску, тиску і зусилля видавлювання та розкриття оправки від геометричних параметрів одержуваної деталі та величини деформації.

**Ключові слова:** видавлювання, метод скінчених елементів, тиск, тертя.

**Aliieva L.I, Martynov S.V, Zhbankov J.G, Goncharuk K.V. The power mode at radial extrusion of the internal flange.**

The purpose of this research is definition of the reduced pressure, pressure and extrusion force and disclosure of mandrel by radial extrusion the internal flange.

A simulation of the radial centripetal extrusion sleeve with inner flange of the finite element method using the software QForm 2D.

The method of experimental design were obtained depending on the reduced pressure, pressure and force the disclosure of the mandrel and extrusion of the geometric parameters obtained by the details and magnitude of the strain.

A simulation of the radial centripetal extrusion sleeve with inner flange of the finite element method using the software QForm 2D. The method of experimental design were obtained depending on the reduced pressure, pressure and force the disclosure of the mandrel and extrusion of the geometric parameters obtained by the details and magnitude of the strain.

**Keywords:** extrusion, the finite element method, pressure, friction.

Алиева Л.И. – к.т.н., доцент кафедры ОМД ДГМА, г. Краматорск,  
e-mail: leyla-ukr@mail.ru

Мартынов С.В. – ассистент кафедры ОМД ДГМА, г. Краматорск,  
e-mail: martynovdgm@gmail.com

Жбанков Я.Г. – к.т.н., ст.преп. кафедры ОМД ДГМА, г. Краматорск,  
e-mail: yzhbankov@gmail.com

Гончарук К.В. – магистр кафедры ОМД ДГМА, г. Краматорск.