

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВОГО РЕЖИМА ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВЫДАВЛИВАНИИ СТЕРЖНЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Алиева Л. И., Клименко Г. П., Мартынов С. В., Гончарук К. В.

Процессы комбинированного выдавливания сочетают в себе преимущества продольного и поперечного выдавливания. Данным способом можно получать детали более сложной формы по сравнению с традиционными способами штамповки. Проведено моделирование процесса комбинированного выдавливания деталей типа стержень с фланцем методом конечных элементов при помощи программного продукта QForm 2D. Цель данного исследования – определение приведенного давления выдавливания и раскрытия матриц при комбинированном выдавливании. В соответствии с проведенным исследованием, было установлено, что очаг деформации сосредоточен на переходных кромках основного деформирующего инструмента и верхней полуматрицы. Методом планирования эксперимента были получены зависимости приведенного давления выдавливания и раскрытия оправки от геометрических параметров получаемой детали и величины контактного трения. Для подтверждения картины течения металла был проведен эксперимент с нанесенной координатной сеткой. Характерное распределение течения материала при теоретическом анализе соответствует проведенному моделированию.

Процеси комбінованого видавлювання поєднують в собі переваги поздовжнього і поперечного видавлювання. Даним способом можливо отримувати деталі більш складної форми в порівнянні з традиційними способами штампування. Проведено моделювання процесу комбінованого видавлювання деталей типу стрижень з фланцем методом скінченних елементів за допомогою програмного продукту QForm 2D. Метою дослідження є визначення приведенного тиску видавлювання і розкриття матриць при комбінованому видавлюванні. Відповідно до проведеного дослідження, було встановлено, що осередок деформації зосереджений на перехідних кромках основного деформуючого інструменту і верхній напівматриці. Методом планування експерименту були отримані залежності приведенного тиску видавлювання та розкриття оправки від геометричних параметрів одержуваної деталі та величини контактного тертя. Для підтвердження картини течії металу було проведено експеримент з нанесення координатної сітки. Характерне розподілення течії матеріалу при теоретичному аналізі відповідає проведеному моделюванню.

Extrusion the combined processes combine the advantages longitudinal and transverse extrusion. This method can obtain a more complex shape parts as compared to conventional stamping methods. The simulation process combined extrusion parts such as rod flange finite element method using the software QForm 2D. The aim of this study – the definition given extrusion pressure and disclosures in the combined extrusion matrices. According to the research, it was found that the deformation zone is focused on transition edges basic tools and deforming the upper half-matrix. Method for planning the experiment were obtained dependence of the reduced pressure extrusion mandrel and disclosure of the geometric parameters and the values obtained details of contact friction. To verify picture of metal flow experiment was conducted with the applied coordinate grid. Characteristic distribution of material flow in the theoretical analysis corresponds to the simulations performed.

Алиева Л. И.

канд. техн. наук, доц. каф. ОМД ДГМА  
[leyla-ukr@mail.ru](mailto:leyla-ukr@mail.ru)

Клименко Г. П.

д-р техн. наук, проф., зав. каф. АПП ДГМА

Мартынов С. В.

ассистент кафедры ОМД ДГМА  
[martynovdigma@gmail.com](mailto:martynovdigma@gmail.com)

Гончарук К. В.

аспирант кафедры ОМД ДГМА  
[goncharuk\\_omd@mail.ua](mailto:goncharuk_omd@mail.ua)

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 611.777.01

Алиева Л. И., Клименко Г. П., Мартынов С. В., Гончарук К. В.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВОГО РЕЖИМА ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВЫДАВЛИВАНИИ СТЕРЖНЕВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Использование комбинированных простых схем выдавливания открывает резервы для интенсификации процесса штамповки, за счет усложнения формы штампуемой детали и сокращения количества технологических переходов [1–3]. Повысить коэффициент использования металла на 15–35% при открытой штамповке можно за счет применения элементов радиального, прямого или обратного выдавливания в комбинированных схемах выдавливания [1, 2, 4–7].

Процессы комбинированного выдавливания сочетают в себе преимущества продольного и поперечного выдавливания. Данным способом можно получать детали более сложной формы по сравнению с традиционными способами штамповки [4, 8, 9]. Применение процессов комбинированного выдавливания позволяет увеличить коэффициент использования металла до 0,98 за счет максимального приближения формы и размеров заготовок к параметрам готовой детали. Благодаря этому достигается значительная экономия металла, уменьшается трудоёмкость последующей обработки резанием. Эти особенности позволяют применять процессы комбинированного выдавливания вместо литья, горячей штамповки и обработки резанием при производстве заготовок и деталей различной конфигурации из черных и цветных металлов и их сплавов [3, 4–7].

Комбинирование схем радиального и обратного (прямого) выдавливания отличается меньшей энергоёмкостью процесса по сравнению с многопереходной штамповкой, большей устойчивостью исходной заготовки в области фланца и разнообразием возможных технологических схем силового и кинематического воздействия на заготовку [3, 5–7, 9, 10].

Цель данного исследования – определение приведенного давления выдавливания и раскрытия матриц при комбинированном двухстороннем выдавливании (рис. 1).

Планирование эксперимента позволяет не только получить коэффициенты уравнения регрессии, но и произвести статистическую обработку полученных экспериментальных данных и их оптимизацию [11].

В результате планирования эксперимента ожидается получить зависимости приведенного давления, давления и усилия выдавливания и раскрытия матрицы от геометрических параметров получаемой детали (относительная высота фланца и относительный диаметр отростка) и величины контактного трения. Зависимой величиной (откликом), в данном случае, будут являться приведенное давление, давление и усилие выдавливания и раскрытия матрицы.

Факторами, влияющими на величину приведенного давления, давления и усилия выдавливания и раскрытия матрицы выбраны относительная высота фланца ( $\bar{h} = \frac{h}{R_1}$ ), относи-

тельный диаметр отростка ( $\bar{R} = \frac{R}{R_1}$ ) и контактное трение ( $\mu$ ). Таким образом, исследуется

трехфакторная модель. Изменение факторов будем вести на трех уровнях [12]. 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).

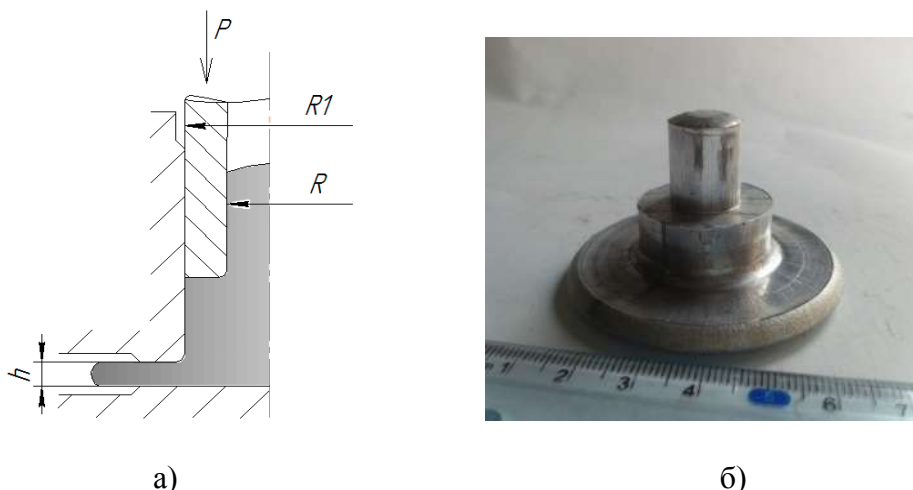


Рис. 1. Схема комбинированного двухстороннего выдавливания (а), полученные детали типа стержень с фланцем (б)

Таблица 1

Уровни факторов			
Факторы	$X_1 (\bar{h})$	$X_2 (\mu)$	$X_3 (\bar{R})$
Основной уровень ( $X_{i_0}$ )	0,30	0,2	0,50
Интервал варьирования ( $\Delta X_i$ )	0,15	0,2	0,25
Верхний уровень ( $x_i = 1$ )	0,45	0,4	0,75
Нижний уровень ( $x_i = -1$ )	0,15	0	0,25

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

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

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

$\Delta X_i$  – интервал варьирования;

$i$  – номер фактора.

Для планов типа  $B_k$  коэффициенты регрессионного уравнения можно определить по следующим формулам (2):

$$\begin{aligned}
 b_0 &= C_1 \sum_{u=1}^N y_u - C_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u, & b_i &= C_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \\
 b_{ij} &= C_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u, & b_{ii} &= C_5 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + C_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - C_2 \sum_{u=1}^N y_u,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

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.

Уравнение регрессии в общем виде может быть представлено формулой (3):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i + \sum_{i=1}^{14} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{14} b_i x_i^2 = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \quad (3)$$

Согласно расширенной матрице плана производилось 14 экспериментов с различными параметрами процесса. Моделирование комбинированного двухстороннего выдавливания производилось при помощи метода конечных элементов в программном продукте QForm 2D. Граничные условия для осесимметричной задачи были заданы в следующем виде: упрочнение алюминиевого материала АД31 описано кривой упрочнения  $\sigma_s = 191.55 \cdot e^{0,202}$  МПа при скорости деформирования  $0,25 \text{ с}^{-1}$ , 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.

На рис. 2 показаны графики зависимости усилия выдавливания и раскрытия матрицы от времени (хода) процесса. С графиков видно, что усилие возрастает на протяжении всего процесса выдавливания. Это связано с увеличением контактной поверхности трения и упрочнения материала.

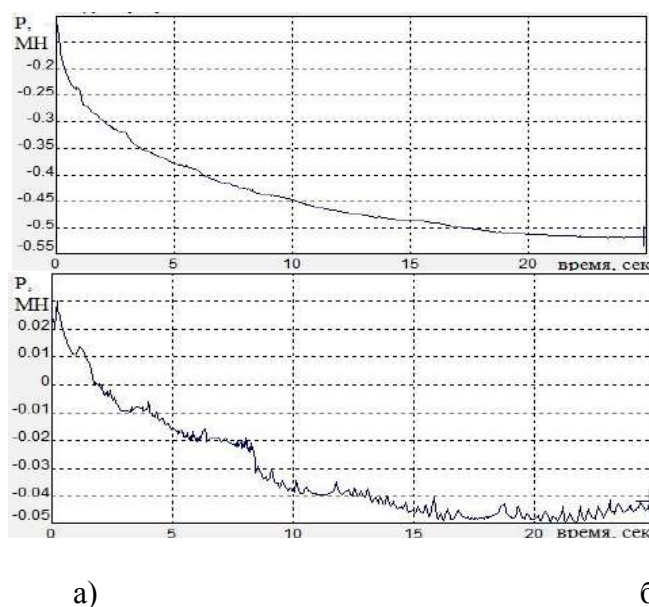


Рис.2. Графики зависимости усилия выдавливания (а) и усилия раскрытия матрицы (б) от времени протекания процесса

В соответствии с проведенным моделированием в пакете QForm, было установлено (рис. 3), что очаг деформации сосредоточен на переходных кромках основного деформирующего инструмента и верхней полуматрицы; максимальные значения логарифмической деформации находятся в пределах  $1,75-1,85$  ( $82\% - 85\%$ ).

С использованием методики, описанной ранее, при помощи программы MathCAD были получены зависимости приведенного давления выдавливания и раскрытия полуматрицы от варьируемых величин (рис. 4–8).

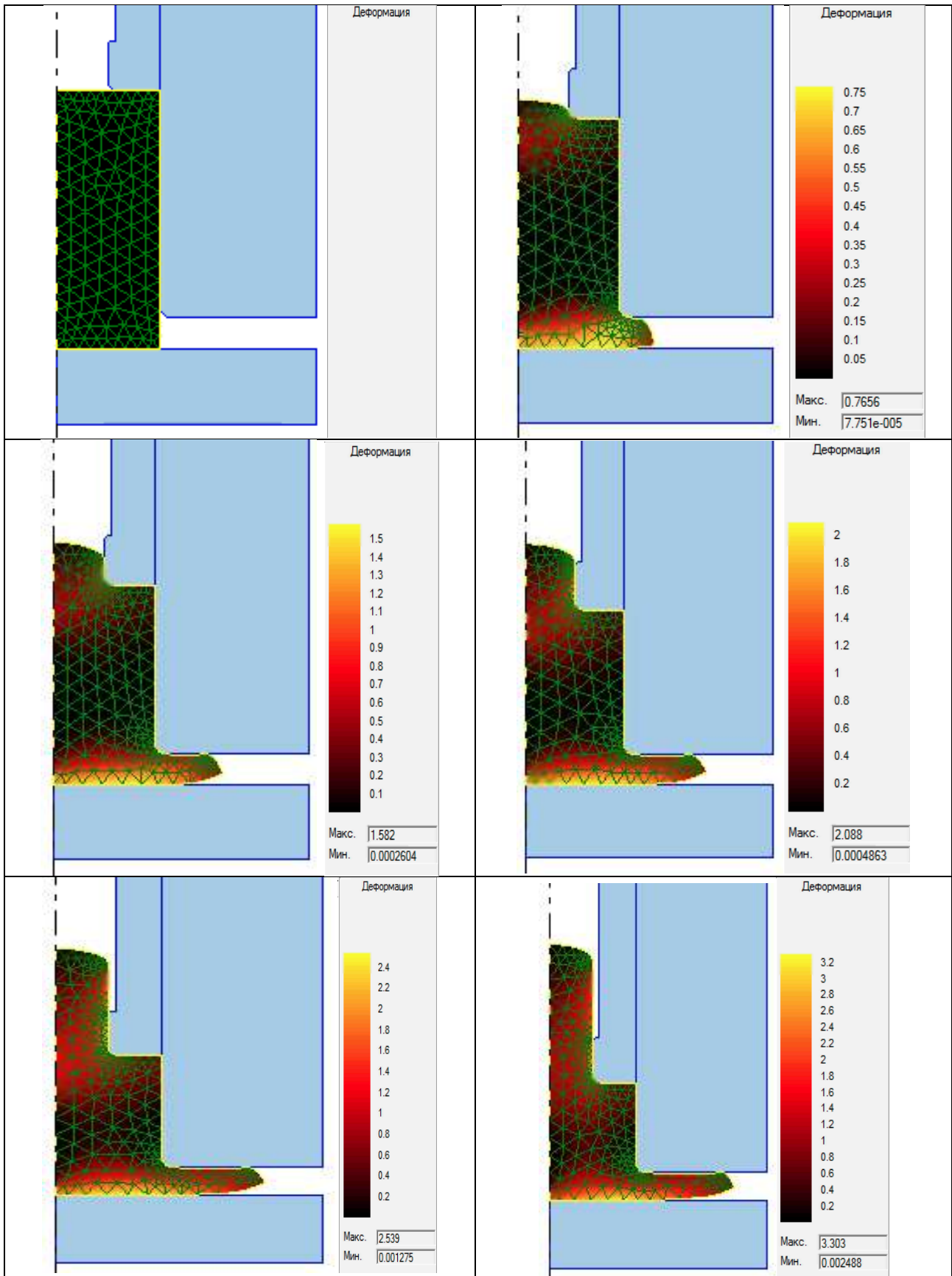


Рис. 3. Картины поэтапного формоизменения заготовки при комбинированном двух-стороннем выдавливании

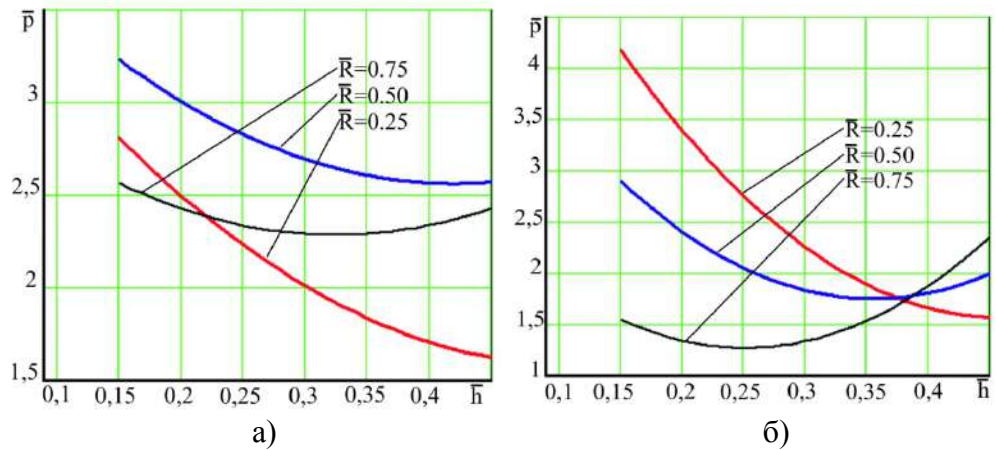


Рис. 4. Графики зависимости приведенного давления (а) и раскрытия матрицы (б) от относительной высоты фланца при разном относительном радиусе отростка

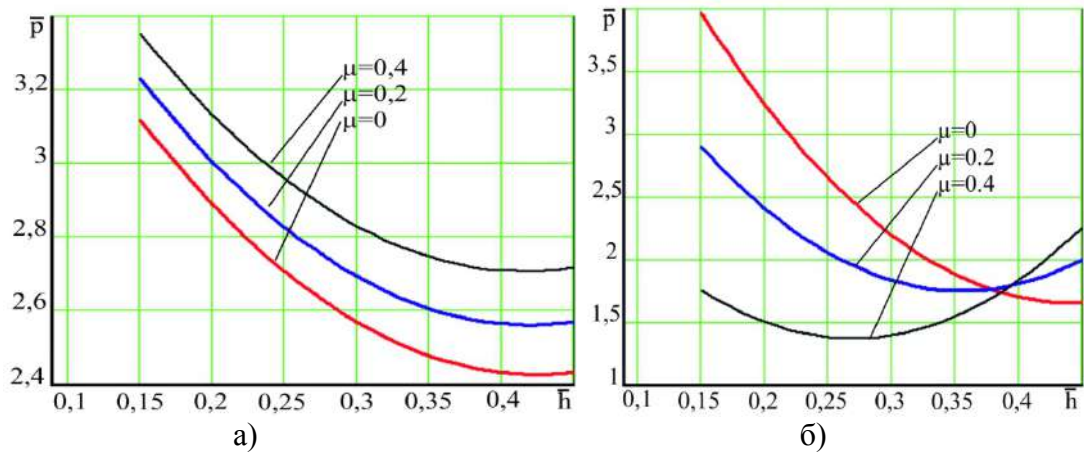


Рис. 5. Графики зависимости приведенного давления (а) и раскрытия матрицы (б) от относительной высоты фланца при разном трении

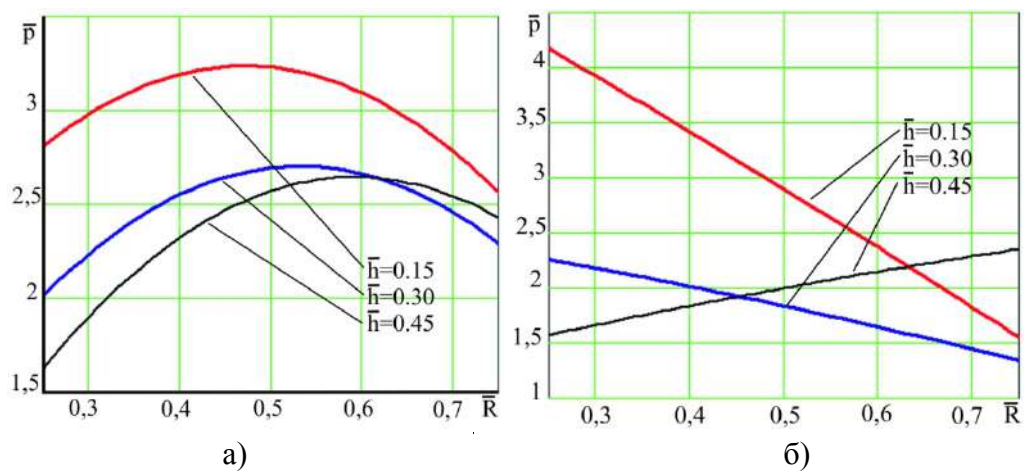


Рис. 6. Графики зависимости приведенного давления (а) и раскрытия матрицы (б) от относительного радиуса отростка при разной относительной высоте фланца

Из графиков, приведенных на рис. 4 видно, что с увеличением относительной высоты фланца, значения приведенного давления выдавливания и раскрытия матрицы снижаются. Это можно объяснить тем, что с увеличением высоты фланца металлу проще заполнять полость, т. е. меняется жесткость системы.

На рис. 5 показано снижение энергосиловых параметров процесса комбинированного выдавливания при разных значениях контактного трения. Это можно объяснить тем, что за счет увеличения высоты фланца происходит уменьшения контактной поверхности трения. В общем, зависимость параметров от трения имеет линейный, или близкий к нему, характер. Для величин раскрытия матрицы, характер распределения не однозначный. Это объясняется различной формой фланца, а соответственно разной поверхностью трения.

Графики на рис. 6 показывают, что с увеличением относительного радиуса отростка показатели приведенного давления падают. Это связано с тем, что металлу проще заполнять полость, которая формируется по средствам обратного выдавливания, а формированию фланца способствует дополнительное растягивающее напряжение.

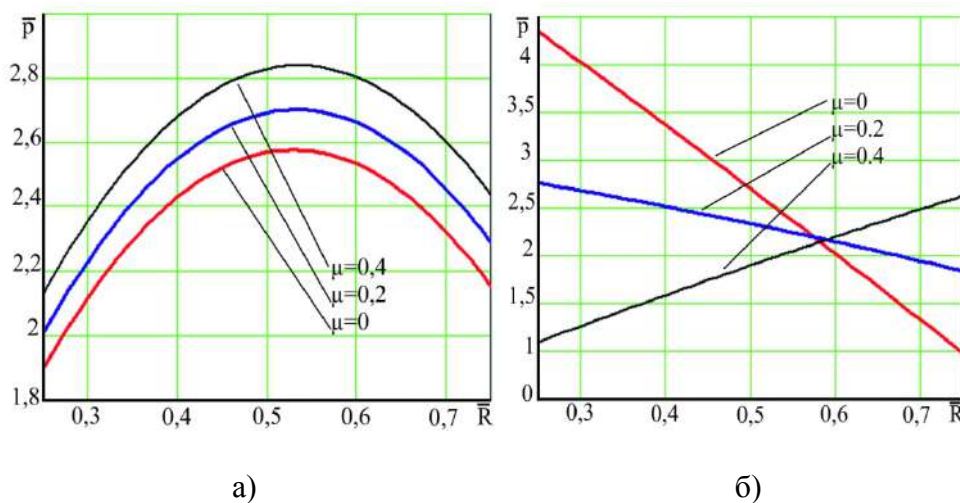


Рис. 7. Графики зависимости приведенного давления (а) и раскрытия матрицы (б) от относительного радиуса отростка при трении

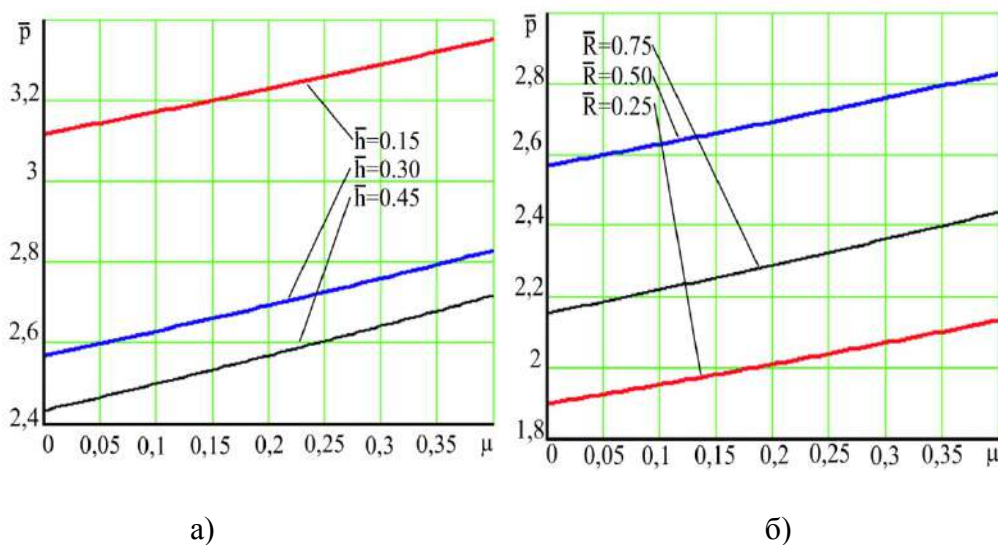


Рис. 8. Графики зависимости приведенного давления от трения при разной относительной высоте фланца (а) и при разном относительном радиусе отростка

Графики зависимости приведенного давления выдавливания (рис. 7, а) имеют параболический характер с максимальными значениями при  $\bar{R} \approx 0,55$ . Для графиков приведенного давления раскрытия матрицы (рис. 7, б) наблюдается переменный характер. При  $\bar{R} \approx 0,57 \div 0,59$  значение параметра одинаковы при разных значениях трения. Такое явление соответствует снижению контактной поверхности трения и благоприятному напряженно-деформированному состоянию.

На рис. 8 показаны зависимости силовых параметров процесса комбинированного выдавливания от контактного трения при разных геометрических параметрах. Все графики имеют линейную зависимость, что является характерным для трения.

## ВЫВОДЫ

Процессы комбинированного выдавливания сочетают в себе преимущества продольного и поперечного выдавливания. Данным способом можно получать детали более сложной формы по сравнению с традиционными способами штамповки. Проведенное моделирование процесса комбинированного двухстороннего выдавливания деталей типа стержень с фланцем методом конечных элементов при помощи программного продукта QForm 2D позволило определить форму и место образования очага деформации. В соответствии с наблюдениями, было установлено, что очаг деформации сосредоточен на переходных кромках основного деформирующего инструмента и верхней полуматрицы. Методом планирования эксперимента были получены зависимости приведенного давления выдавливания и раскрытия матрицы от геометрических параметров получаемой детали и величины контактного трения. Для подтверждения картины течения металла был проведен эксперимент с нанесенной координатной сеткой. Характерное распределение течения материала при теоретическом анализе соответствует проведенному моделированию.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковка и штамповка. Справочник в 4-х т. / Под ред. Е. И. Семенова [и др.] М. : Машиностроение. 1987. Т.3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г. А. Навроцкого, 1987. 384 с.
2. Евстратов В. А. Состояние, направления развития и проблемы холодного и полугорячего выдавливания. / В. А. Евстратов. // Кузнечно-штамповочное производство. 1985. – № 10. – С.10–11.
3. Евстратов В. А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. / В. А. Евстратов. Харьков : Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те. 1987, – 144 с.
4. Люкович Б. М. Теоретичні основи обробки металів тиском: монографія / Б. М. Люкович, А. П. Огурцов, М. С. Нехаєв, С. В. Єршов. : У 2 т. – Дніпропетровськ : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. – Т.2. – 485 с.
5. Алиев И. С. Поиск и классификация новых технологических способов выдавливания /И. С. Алиев // Сборник научных статей. – Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия. 2000. – С. 207–212.
6. Алиев И. С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания /И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. 1988.– № 6.– С. 1 – 4.
7. Алиев И. С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания /И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. 1990.– № 2.– С. 7 – 10.
8. Geiger Rolf. Der Stofffluss beim kombinierten Napffliesspressen // Berichte Inst. Umformtechnik. Univ. Stuttgart, 1976. N 36. 196 s.
9. Werner Niefer. Einsatz der Massivumformung in der Automobilindustrie. // Umformtechnik 26 (1992) 6, S 393–395.
10. Оптимизация технологических процессов и конструкций штампов для холодного и полугорячего выдавливания / В. А. Евстратов, О. М. Иванов, В. И. Кузьменко [и др.] М. :ВНИИТЭМР, 1989. 184 с.
11. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методом планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов // Машиностроение. – 1980. – 304 с.
12. 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.