

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ РАДИАЛЬНО-ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

Алиева Л.И., Гончарук К.В., Лебедь В. Т., Таган Л.В.

Повышение практического использования научных результатов является одним из основных направлений в развитии металлургии и машиностроения. Важнейшим фактором в решении технологических задач является разработка новых процессов, позволяющих получать изделия высокого качества с заданными эксплуатационными свойствами. В связи с этим необходимо также непрерывное улучшение традиционных процессов холодного выдавливания и переход от простых базовых процессов к более сложным – комбинированное и совмещенное выдавливание. Одна из проблем при расчёте технологического процесса комбинированного выдавливания – это отсутствие рекомендаций по определению энергосиловых параметров процесса. Такими факторами, которые значительно влияют на усилие процесса, являются напряженно-деформированное состояние и формоизменение процесса. Целью данной работы является анализ напряженно-деформированного состояния и формоизменения на энергосиловые параметры процесса комбинированного выдавливания. С использованием метода конечных элементов был получен массив данных, который позволил оценить напряженно-деформированное состояние и описать формоизменение детали.

Підвищення практичного використання наукових результатів є одним з основних напрямків у розвитку металургії та машинобудування. Найважливішим фактором у вирішенні технологічних завдань є розробка нових процесів, що дозволяють отримувати вироби високої якості з заданими експлуатаційними властивостями. У зв'язку з цим необхідно так само неухильне поліпшення традиційних процесів холодного видавлювання і перехід від простих базових процесів до більш складним – комбіноване і поєднане видавлювання. Одна з проблем при розрахунку технологічного процесу комбінованого видавлювання – це відсутність рекомендацій щодо визначення енергосилових параметрів процесу. Такими факторами, які значно впливають на зусилля процесу, є напружено-деформований стан і формозміна процесу. Метою даної роботи є аналіз напружено-деформованого стану та формозміни на енергосилові параметри процесу комбінованого видавлювання. З використанням методу скінченних елементів був отриманий масив даних, який дозволив оцінити напружено-деформований стан і описати формозміну деталі.

Increasing practical use of research results is one of the main directions in the development of metallurgy and machine building. The most important factor in solving the technological problems is the development of new processes to obtain high-quality products with desired performance characteristics. In this regard, it is necessary as the continuous improvement of the traditional cold extrusion process and the transition from simple basic to more complex processes - combined and combined extrusion. One of the problems in the calculation of the combined extrusion process is the lack of recommendations for the definition of energy-power parameters of the process. These factors, which significantly influence the process of stress, are the stress-strain state and forming process. The purpose of this paper is to analyze the stress-strain state and forming on the energy-power parameters of the process of combined extrusion. By using the finite element method was obtained by an array of data that allowed us to estimate the stress-strain state and describe the deformation of the part.

Алиева Л. И.

канд. техн. наук, докторант каф. ОМД ДГМА

Гончарук К. В.

аспирант каф. ОМД ДГМА  
goncharuk\_omd@mail.ua

Лебедь В. Т.

д-р техн. наук, доц., зав. каф. ЭСА ДГМА

Таган Л. В.

канд. техн. наук, ассист. каф. ОМД ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 611. 777. 01

Алиева Л. И., Гончарук К. В., Лебедь В. Т., Таган Л. В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ РАДИАЛЬНО-ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

Развитие науки тесным образом связано с повышением практического использования ее результатов в промышленности. Важнейшим фактором в решении технологических задач является разработка новых процессов, позволяющих получать изделия высокого качества с заданными эксплуатационными свойствами и с наименьшими затратами на их производство. В связи с этим необходимо также непрерывное улучшение традиционных процессов холодного выдавливания и переход от простых базовых процессов к более сложным – комбинированное и совмещенное выдавливание [1, 2].

Одним из прогрессивных ресурсосберегающих методов получения изделий высокого качества является холодная объемная штамповка. При холодной объемной штамповке достигается: деформационное упрочнение, отсутствие надразов, появляется направленность волокон вдоль конфигурации штампованной заготовки, улучшается микрогеометрия, увеличивается коэффициент использования металла (по сравнению с обработкой резанием, литьем и горячей штамповкой).

На современном этапе развития вычислительной техники стало возможным применение наукоемких математических моделей и методов (метод конечных элементов), позволяющих в довольно короткие сроки получить приближенные картины поэтапного формоизменения и напряженно-деформированного состояния [3, 4]. Для анализа напряженно-деформированного состояния при комбинированном радиально-прямом выдавливании деталей с фланцем и осевым отростком методом конечных элементов использовался программный продукт QForm 2D [5, 6].

Целью данной работы является описание напряженно-деформированного состояния и формоизменения заготовки при радиально-прямом выдавливании на основе МКЭ.

Граничные условия для осесимметричной задачи были заданы в следующем виде: упрочнение алюминиевого материала АД31 описано кривой упрочнения  $\sigma_s = 191.55 \cdot e^{0,202} \text{ МПа}$ ; плотность материалов  $2800 \text{ кг/м}^3$ ; скорость деформирования  $0,25 \text{ с}^{-1}$ , 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.

По результатам расчетов МКЭ получен массив математических экспериментов в виде полей деформаций (рис. 1) и напряжений (рис. 2).

В соответствии с проведенным моделированием, было установлено, что очаг деформации сосредоточен на переходных кромках деформирующего инструмента (полуматриц); максимальные значения логарифмической деформации находятся в пределах  $82\%–85\%$ . Искажение делительной сетки показывает отсутствие появлений дефектов в заготовке [4].

Распределение сопротивления деформации по ходу деформирования показывает, что максимальные значения напряжений сосредотачиваются непосредственно в очаге деформации, а также во фланце и периферийной части отростка. Согласно наблюдениям [7] можно сделать вывод, что по линии, проходящей от кромки верхней полуматрицы к кромке верхней полуматрицы наблюдается сосредоточение максимальных напряжений.

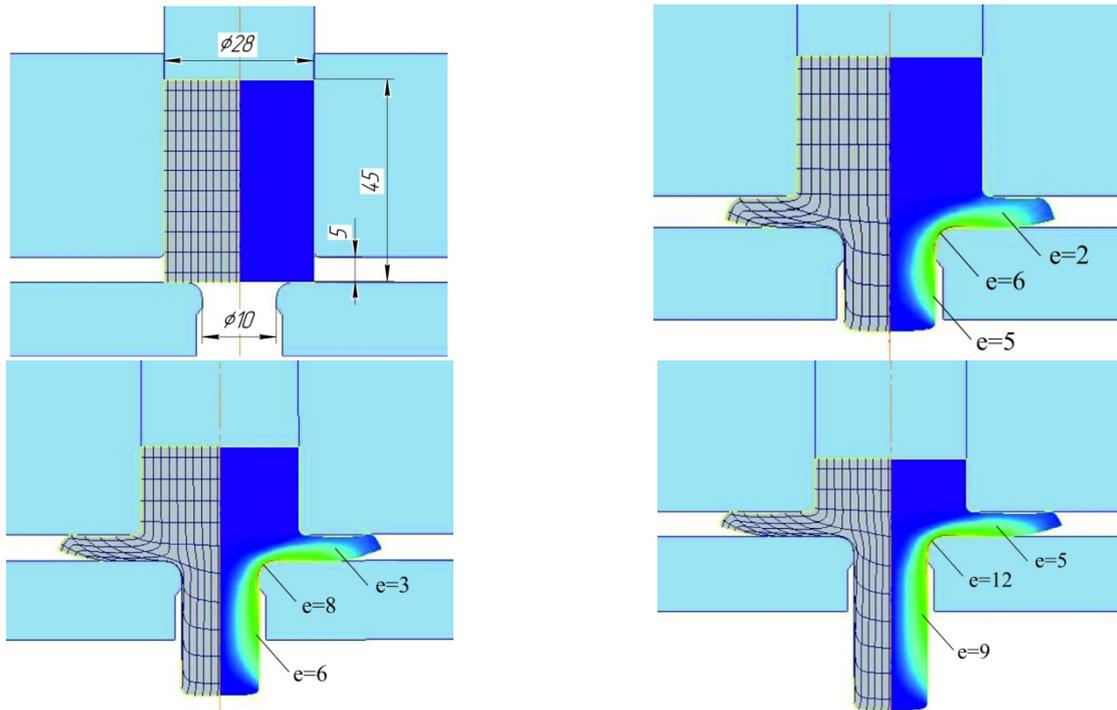
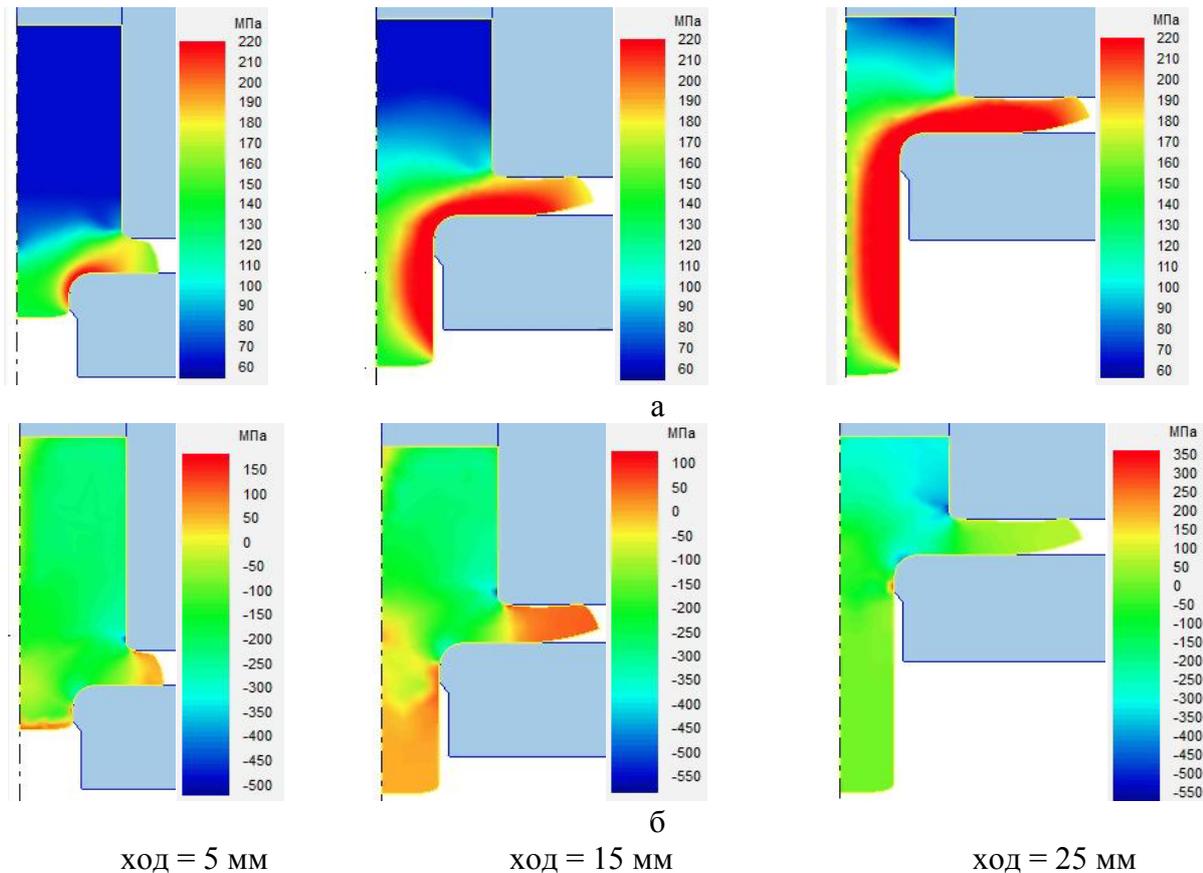


Рис. 1. Распределение значений степени деформации при поэтапном деформировании заготовки для материала АД31



ход = 5 мм

ход = 15 мм

ход = 25 мм

Рис. 2. Распределение сопротивления деформации (а) и среднего гидростатического напряжения (б) по ходу деформирования заготовки для материала АД31

Поэтому, эта область требует дальнейших исследований. Кроме того, центральная часть отрезка остается не проработанной, что является значительным недостатком при эксплуатации готовых деталей.

Для анализа энергосиловых параметров комбинированного радиально-прямого выдавливания построены графики зависимости усилия выдавливания в зависимости от различной высоты фланца при стационарном радиусе отрезка (рис. 3, а) и от радиуса отрезка при постоянном фланце по ходу процесса (рис. 3, б).

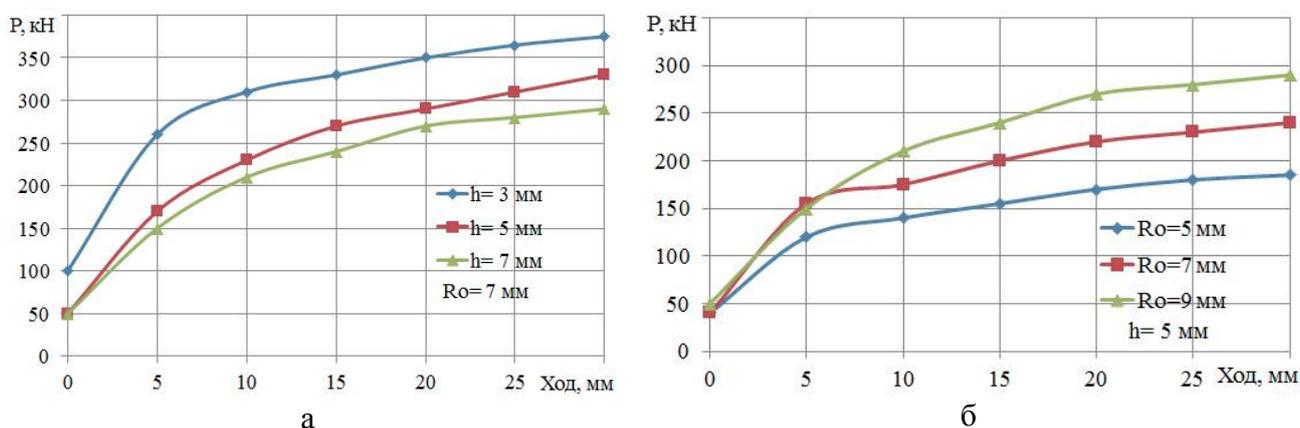


Рис. 3. Изменение усилия радиально-прямого выдавливания при разной высоте фланца (а) и разным радиусе отрезка (б)

Для обработки статистических данных применен математический аппарат планирования эксперимента [2, 8].

В результате планирования эксперимента ожидается получить зависимости энергосиловых параметров выдавливания от геометрических параметров (относительная высота фланца  $\bar{h} = h/R_3$ , относительный радиус отрезка  $\bar{R}_0 = R_0/R_3$  и относительный радиус закругления матрицы  $\bar{R} = R/R_3$ , где  $R_3 = 14$  мм).

Уравнение регрессии представлено формулой:

$$\begin{aligned}
 Y(h, R_0, R) = & b_0 + b_1 \cdot \frac{h - 0.33}{0.13} + b_2 \cdot \frac{R_0 - 0.5}{0.16} + b_3 \cdot \frac{R - 0.14}{0.07} + \\
 & + \left( b_{12} \cdot \frac{h - 0.33}{0.13} \cdot \frac{R_0 - 0.5}{0.16} \right) + \left( b_{13} \cdot \frac{h - 0.33}{0.13} \cdot \frac{R - 0.14}{0.07} \right) + \\
 & + \left( b_{23} \cdot \frac{R_0 - 0.5}{0.16} \cdot \frac{R - 0.14}{0.07} \right) + b_{11} \cdot \left( \frac{h - 0.33}{0.13} \right)^2 + b_{22} \cdot \left( \frac{R_0 - 0.5}{0.16} \right)^2 + b_{33} \cdot \left( \frac{R - 0.14}{0.07} \right)^2
 \end{aligned} \quad (1)$$

Коэффициенты регрессионного уравнения определены для данной схемы в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты регрессионного уравнения										
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$
$\bar{p}$	1.64	-0.09	0.3	-0.07	0.03	0.05	-0.05	0.01	-0.04	0.06
$\frac{V_{\text{фланца}}}{V_{\Sigma}}$	0.701	0.086	0.16	-0.013	-0.017	0.0005	0.0005	-0.03	-0.021	0.000375

С использованием методики планирования эксперимента при помощи программы MathCAD были получены зависимости приведенного давления выдавливания (рис. 4) от варьируемых величин.

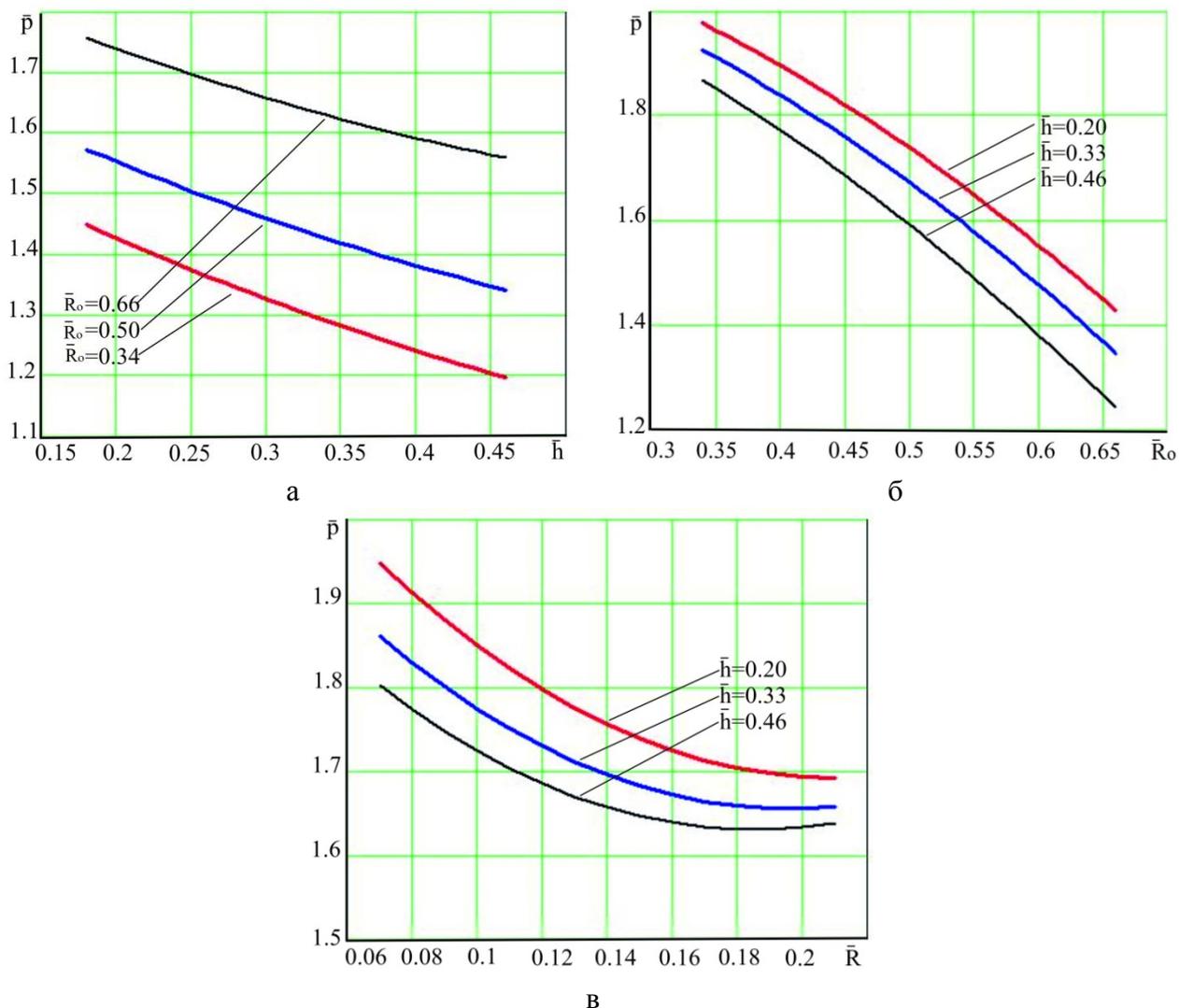


Рис. 4. График зависимости приведенного давления относительной высоты фланца (а), от относительного радиуса отрезка (б), от относительного радиуса закругления матрицы (в) ( $\bar{h} = 0.20 = 3$  мм,  $\bar{h} = 0.33 = 5$  мм,  $\bar{h} = 0.46 = 7$  мм,  $\bar{R}_0 = 0.34 = 5$  мм,  $\bar{R}_0 = 0.50 = 7$  мм,  $\bar{R}_0 = 0.66 = 9$  мм)

Снижение характеристик энергосиловых параметров при изменении относительной высоты фланца  $\bar{h}$  наблюдается на рис. 4, а. Подобный характер изменения значений наблюдается за счет уменьшения степени деформации во фланце. При изменении относительного радиуса отрезка  $\bar{R}_0$  (рис. 4, б) приведенное давление возрастает с увеличением данного параметра. Это связано с изменением напряженного состояния при прямом выдавливании. Также увеличивается контактная поверхность трения с нижней полуматрицей.

Из графиков, приведенных на рис. 4 в, видно, что приведенное давление с увеличением относительного радиуса закругления матрицы  $\bar{R}$  падает. Это связано с появлением плавного течения материала. Также при наличии большего радиуса закругления снижается концентрация напряжений в месте изменения поперечного сечения.

Исследование формоизменения при комбинированном радиально-прямом выдавливании с использованием МКЭ.

Набор полученных данных при моделировании МКЭ с использованием планирования эксперимента позволяют проанализировать формоизменение заготовки при разных геометрических размерах.

При изменении относительной высоты фланца от  $\bar{h} = 0.20$  до  $\bar{h} = 0.46$  при других равных геометрических параметрах наблюдается прирост объема металла во фланцевой зоне. Соответственно линейные размеры длины отростка сокращаются. Изменение радиуса отростка от  $\bar{R}_0 = 0.34$  до  $\bar{R}_0 = 0.66$  увеличивает объем металла вытекаемого в продольном направлении выдавливания. При исследовании влияния радиуса закругления нижней матрицы в пределах  $\bar{R} = 0.07...0.21$  не показывает значительного изменения линейных размеров полуфабриката.

Для более детального описания прироста линейных размеров заготовки и объемных ее частей построены графики формоизменения полуфабриката с соотношением начальных размеров  $H_3/D_3 = 1,5$  (рис. 5–6).

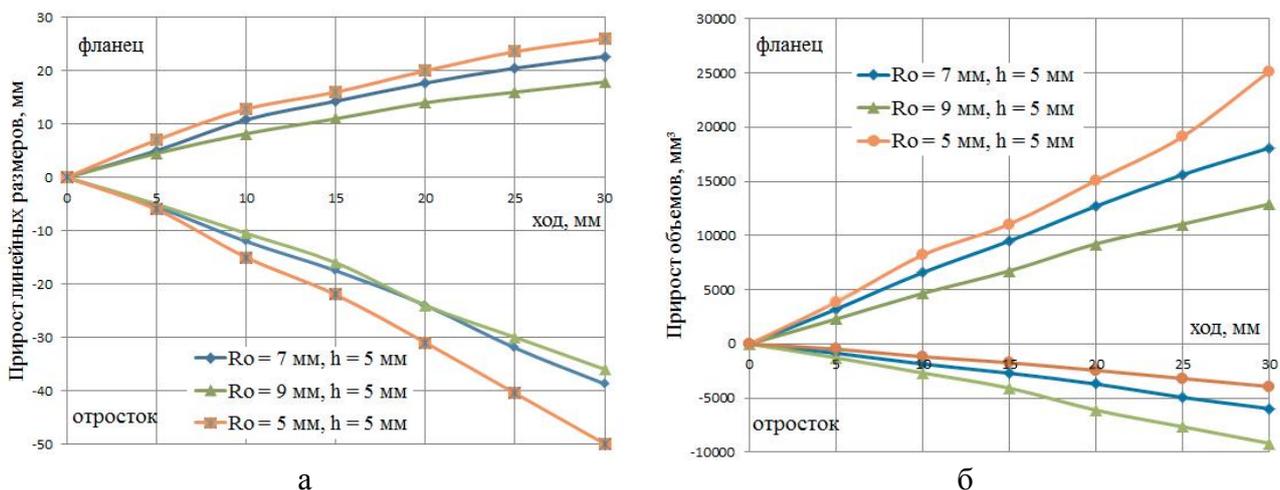


Рис. 5. Прирост линейных размеров (а) и объемов (б) при радиально-прямом выдавливании с варьируемым радиусом отростка

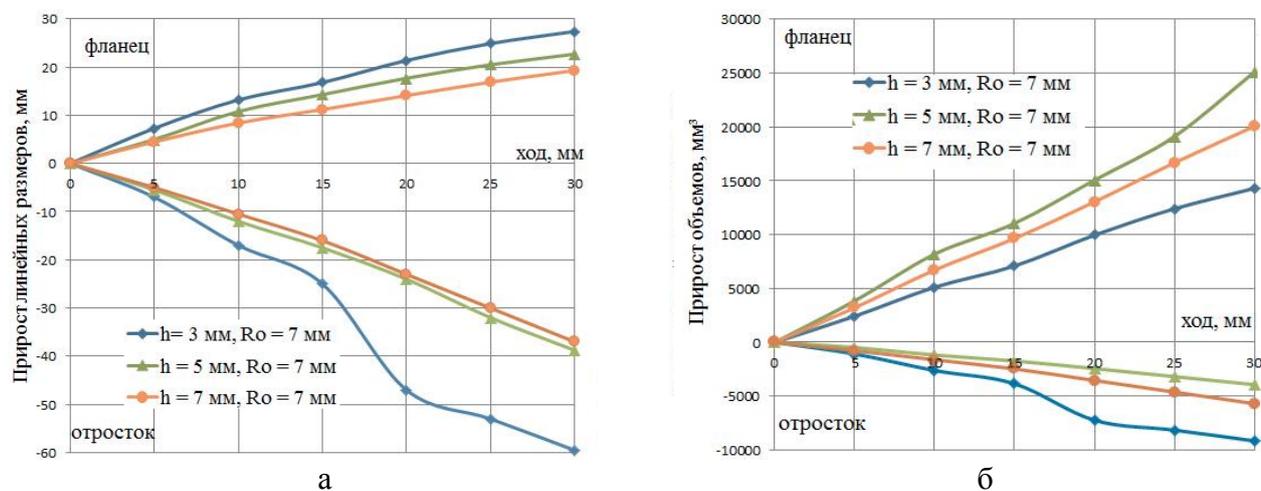


Рис. 6. Прирост линейных размеров (а) и объемов (б) при радиально-прямом выдавливании с варьируемой высотой фланца

Для анализа формоизменения, с помощью планирования эксперимента, было рассмотрено соотношение количества истекаемого материала во фланец к общему объёму проработанного материала  $V_\phi/V$ . Уравнение регрессии (1) справедливо и для расчета прироста объемов металла. Коэффициенты регрессионного уравнение для данного случая представлены в табл. 1. Полученные графики показаны на рис. 7.

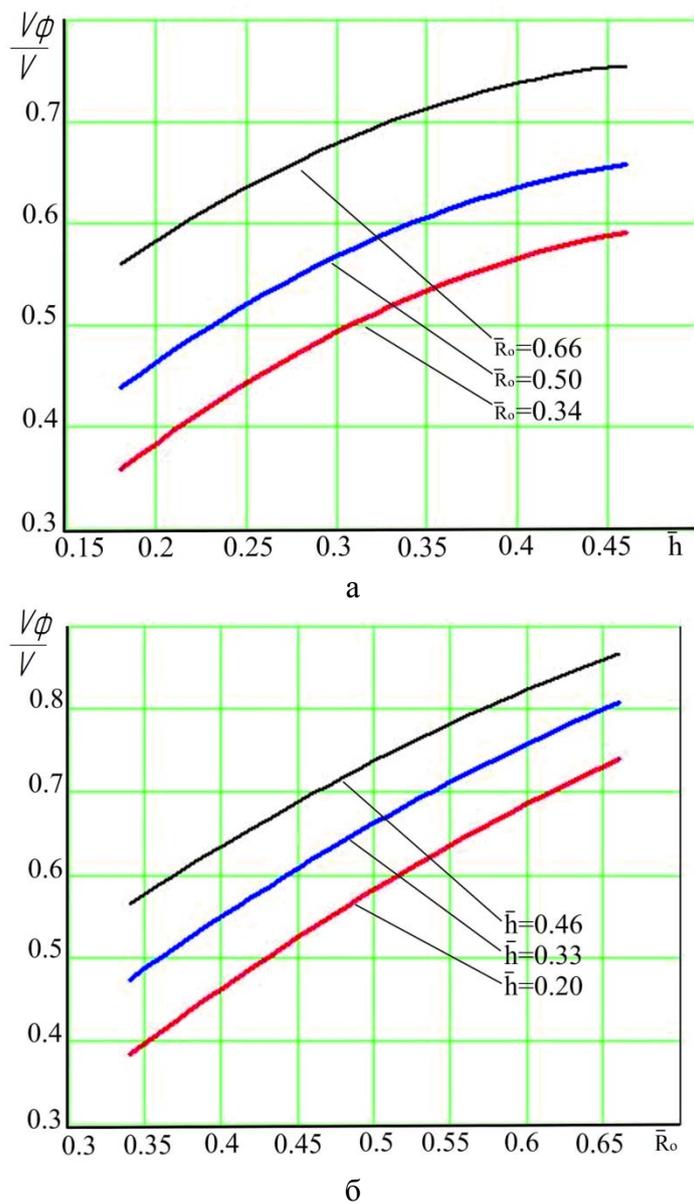


Рис. 7. Анализ формоизменения полуфабриката при радиально-прямом выдавливании на основе планирования эксперимента ( $\bar{h} = 0.20 = 3$  мм,  $\bar{h} = 0.33 = 5$  мм,  $\bar{h} = 0.46 = 7$  мм,  $\bar{R}_0 = 0.34 = 5$  мм,  $\bar{R}_0 = 0.50 = 7$  мм,  $\bar{R}_0 = 0.66 = 9$  мм)

Увеличение относительной высоты фланца  $\bar{h}$  приводит к увеличению количества металла, который заполняет полость фланца. Для истечения материала в радиальном направлении благоприятно влияют напряжения растяжения. С возрастанием относительного радиуса отрезка  $\bar{R}_0$  повышается способность течения материала в прямом направлении.

## ВЫВОДЫ

Применение метода конечных элементов позволило дать оценку напряженно-деформированного состояния заготовки при радиально-прямом выдавливании. В соответствии с проведенным моделированием, было установлено, что очаг деформации сосредоточен на переходных кромках деформирующего инструмента (полуматриц); максимальные значения логарифмической деформации находятся в пределах 82%–85%.

Распределение сопротивления деформации позволило определить места сосредоточения максимальных значений и сделать предположение, которое требует дальнейшего исследования, о вероятности появления дефектов на границе сосредоточения максимальных сдвиговых деформаций.

Графически описаны энергосиловые параметры комбинированного выдавливания в зависимости от основных геометрических параметров схемы.

На основе полученных данных при моделировании МКЭ с использованием планирования эксперимента проанализировано формоизменение заготовки при разных геометрических размерах. Построены графики прироста линейных размеров заготовки и ее объемных частей по ходу деформирования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанский Л.Г. Система управления качеством изделий, изготавливаемых холодной объемной штамповкой / Л.Г. Степанский, А.Н. Шляхин, А.В. Кутьишкин // КШП. – № 9. – 2005. – С. 44–46.
2. Kawalla R. Качество путем обработки давлением / Kawalla R., Lehnert W. // *Qualitat durch Umformung. Metalurgija (Zagreb)*. 2004. – 43, N 3. – С. 169–179. – Нем.; рез. рус., хорват. – HR. ISSN 0543-5846.
3. Алиева Л.И. Компьютерное моделирование силового режима при комбинированном выдавливании стержневых деталей / Л.И. Алиева, Г.П. Клименко, С. В. Мартынов, К.В. Гончарук // *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии: сборник научных трудов*. – Краматорск: ДГМА, 2013. – № 2 (12E). – С. 44–51.
4. Алиева Л.И. Силовые параметры комбинированного выдавливания стержневых деталей с фланцем / Л.И. Алиева, К.В. Гончарук // *Обработка материалов давлением: сборник научных трудов*. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 18–22.
5. Modelling of cold extrusion with experimental verification / P. Tierman, M. T. Hillery, B. Draganescu, M. Gheorghe // *J. Mater. Process. Technol.* – 2005. – 168, N 2. – P. 360–366.
6. QForm – универсальная и эффективная программа для моделирования коки и штамповки / Н.В. Биба, С.А. Стебунов, Ю.А. Гладков, П.С. Мордвинцев // КШП. – № 1. – 2011. – С. 36–42.
7. Гончарук Х.В. Експериментальне дослідження процесу радіально-повдовжнього деформування / Х.В. Гончарук, С.В. Ковалевский, М.Ю. Корденко // *Тези доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти»*. – Київ–Херсон, 2016. – С. 56–57.
8. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методом планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов // *Машиностроение*. – 1980. – 304 с.