

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ИНСТРУМЕНТА НА ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОСАДКЕ****Гончарук К. В., Алиева Л. И., Грудкина Н. С., Таган Л. В., Шкира А. В.**

На данном этапе развитие основных направлений в металлургии и машиностроении связано с разработкой технологий холодного выдавливания, обеспечивающих изготовление деталей при приложении меньших деформирующих усилий. Преимущественным является применение как для осадки кольцами, в результате которой происходит комбинированное течение металла, так и для процессов холодной штамповки при получении деталей с отростком. Одной из проблем при расчёте технологического процесса комбинированного выдавливания является отсутствие рекомендаций по определению энергосиловых параметров процесса. Целью данной работы является определение энергосиловых параметров процесса комбинированной осадки при различной форме инструмента. Использование энергетического метода позволило получить аналитические и графические зависимости приведённого давления от разных геометрических параметров, а также провести оптимизацию процесса комбинированного деформирования. Методом баланса мощностей разработана математическая модель процесса комбинированной осадки с использованием разной геометрии инструмента. Установлены зависимости приведенного давления от кинематических параметров процесса.

На даному етапі розвиток основних напрямків в металургії і машинобудуванні пов'язаний з розробкою технологій холодного видавлювання, що забезпечують виготовлення деталей при прикладанні менших деформируючих зусиль. Переважним є застосування як для осадження кільцями, в результаті якого відбувається комбінована течія металу, так і для процесів холодного штампування при отриманні деталей з відростком. Однією з проблем при розрахунку технологічного процесу комбінованого видавлювання є відсутність рекомендацій щодо визначення енергосилових параметрів процесу. Метою даної роботи є визначення енергосилових параметрів процесу комбінованого осадження при різній формі інструменту. Використання енергетичного методу дозволило отримати аналітичні і графічні залежності приведенного тиску від різних геометричних параметрів, а також провести оптимізацію процесу комбінованого деформування. Методом балансу потужностей розроблена математична модель процесу комбінованого осадження з використанням різної геометрії інструменту. Встановлено залежності приведенного тиску від кінематичних параметрів процесу.

At this stage of development of the main directions in metallurgy and mechanical engineering related to the development of cold extrusion technology, ensuring the production of parts by applying lower deforming forces. It is advantageous to use a precipitation rings, which occurs as a result of the combined flow of metal, as well as for cold forming processes during the outgrowth with parts. 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. The aim of this work is to determine the energy-power parameters of the process of combined precipitation in various forms of the instrument. Using energy method allowed to obtain analytical and graphics depending on the given pressure of different geometrical parameters, as well as to optimize the process of combined deformation. The method of power balance developed a mathematical model of combined precipitation with different tool geometry. The dependences of the reduced pressure on the kinematic parameters of the process.

Алиева Л. И.

канд. техн. наук, доц. каф. ОМД ДГМА  
omd@dgma.donetsk.ua

Грудкина Н. С.

канд. техн. наук, доц. каф. ВМ ДГМА

Таган Л. В.

канд. техн. наук,  
ассистент каф. ОМД ДГМА

Гончарук К. В.

аспирант каф. ОМД ДГМА

Шкира А. В.

аспирант каф. ОМД ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 611. 777. 01

Гончарук К. В., Алиева Л. И., Грудкина Н. С., Таган Л. В., Шкира А. В.

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ИНСТРУМЕНТА НА ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОСАДКЕ**

В настоящее время одним из направлений, позволяющих расширить границы применения объемной штамповки, является разработка технологий холодного выдавливания, обеспечивающих изготовление деталей при приложении меньших деформирующих усилий. Этому способствует исследование недостаточно изученных способов выдавливания и применение полученных результатов при проектировании энергосберегающих технологий изготовления изделий [1].

На сегодняшний день преимущественным является применение осадки кольцами, в результате которой происходит комбинированное течение металла. Данное распределение течения металла актуально как для процессовковки крупных поковок, при котором происходит вытеснение некачественного металла бесприбыльного слитка в отверстие кольца, так и для процессов холодной штамповки при получении деталей с отроостком. Во всех случаях возможно применение плит различной конфигурации: плоских, вогнутых и выпуклых. Соответственно, актуальным является математический анализ энергосиловых параметров процессов комбинированной осадки [2, 3].

Для решения данных задач выбран энергетический метод (ЭМ). ЭМ приемлем для процессов формоизменения, когда требуется разработка математических моделей, которые позволили бы оценить не только развитие энергосилового режима, включающего активную деформирующую нагрузку, но и прогнозировать характер и особенности нарастания размеров и формирования контура поковки [4, 5].

Целью работы является определить энергосиловые параметры процесса комбинированной осадки при разной форме инструмента.

Согласно ЭМ в деформируемой заготовке выделяют ряд характерных пластических зон – кинематических модулей (элементов). Для каждого модуля находят кинематически возможное поле скоростей (КВПС) и на его основе полную мощность деформирования, минимизация которой позволяет оптимизировать параметры процесса деформации и уточнить оценки силовых параметров и картин пластического течения.

Основное уравнение энергетического баланса мощностей внешних и внутренних сил (деформирования, среза и трения) на КВПС связывает мощность внешних активных сил с мощностью внутренних сил:

$$p \cdot F \cdot V_0 = \iiint_V \sigma_s \cdot \dot{\varepsilon}_i dV + \iint_{F_T} \tau_k \cdot [V_k] dF_T + \iint_{F_c} \tau_s \cdot [V_c] dF_c .$$

Из уравнения энергетического баланса мощностей получено значение давления деформирования  $p$  и приведенное давление:

$$p = \frac{\sum N_{di} + \sum N_{Tj} + \sum N_{ck}}{F \cdot V_0}, \quad \bar{p} = \frac{p}{2k} = p/\sigma_s ;$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести материала заготовки, МПа;

$k$  – постоянная пластичности, МПа,  $k = \sigma_s / \sqrt{3}$ .

Схема разбивки очага деформации на блоки с разной формой инструмента представлена на рис. 1.

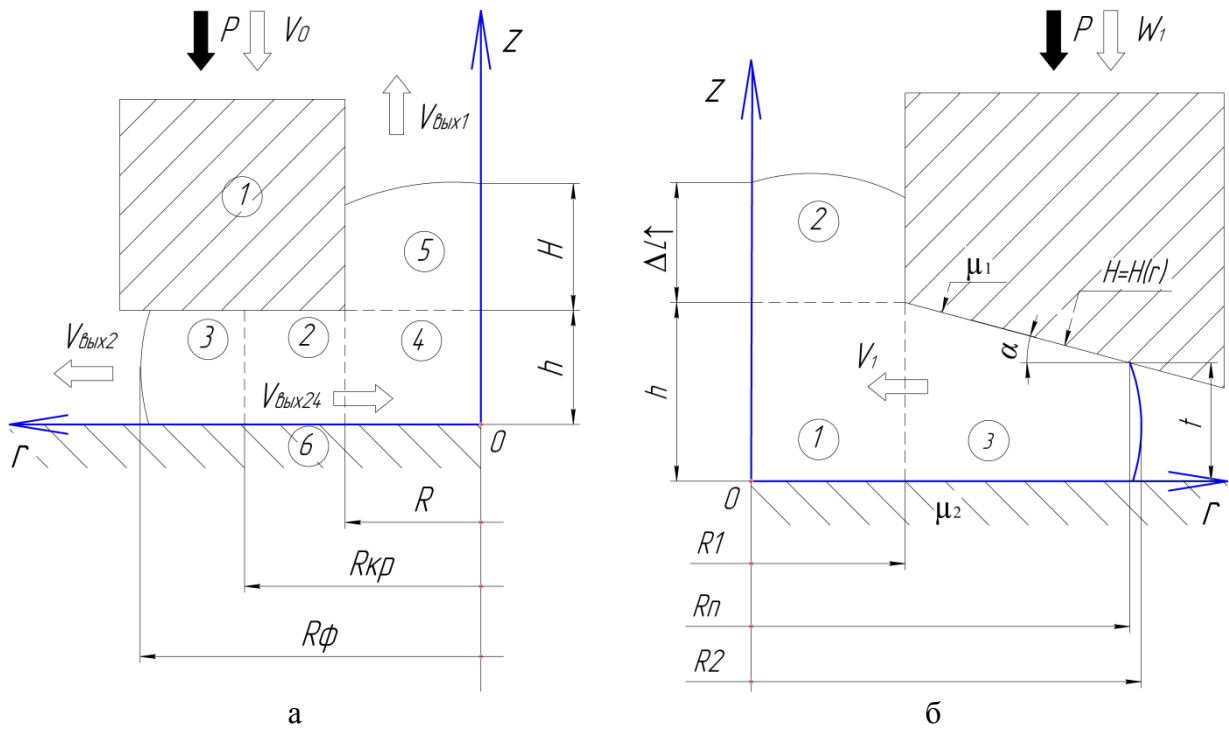


Рис. 1. Схемы разбивки очага деформации с использование плоского (а) и вогнутого (б) инструмента

Согласно методике [4] составлены значения компонентов скоростей  $V_z$  и  $V_r$  (КВПС) для схемы деформации с плоским инструментом и определены значения интенсивности деформации  $\dot{\epsilon}_i$  для зон очага деформации (табл. 1).

Таблица 1

Значения КВПС и интенсивности деформации для схемы с плоским инструментом

Зона	Скорость $V_z$	Скорость $V_r$	Значение $\dot{\epsilon}_i$
2	$V_{z2} = -\frac{V_0}{h} \cdot z$	$V_{r2} = \frac{V_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{V_0 \cdot R_{кр}^2}{2 \cdot h \cdot r}$	$\frac{V_0}{2 \cdot h} + \frac{V_0 \cdot R_{кр}^2}{2 \cdot h \cdot r^2}$
3	$V_{z3} = -\frac{V_0}{h} \cdot z$	$V_{r3} = \frac{V_0}{2 \cdot h} \cdot r - \frac{V_0 \cdot R_{кр}^2}{2 \cdot h \cdot r}$	$\frac{V_0}{2 \cdot h} + \frac{V_0 \cdot R_{кр}^2}{2 \cdot h \cdot r^2}$
4	$V_{z4} = -\frac{V_0 \cdot (R_{кр}^2 - R^2)}{R^2 \cdot h} \cdot z$	$V_{r4} = \frac{V_0 \cdot (R_{кр}^2 - R^2)}{2 \cdot R^2 \cdot h} \cdot r$	$\frac{V_0 \cdot (R_{кр}^2 - R^2)}{2 \cdot R^2 \cdot h}$

Используя математический аппарат, были построены графики зависимости энергосиловых параметров от геометрии процесса (для плоского инструмента). Исходя из полученных данных, были построены графики зависимости приведенного давления от разных геометрических параметров (рис. 2).

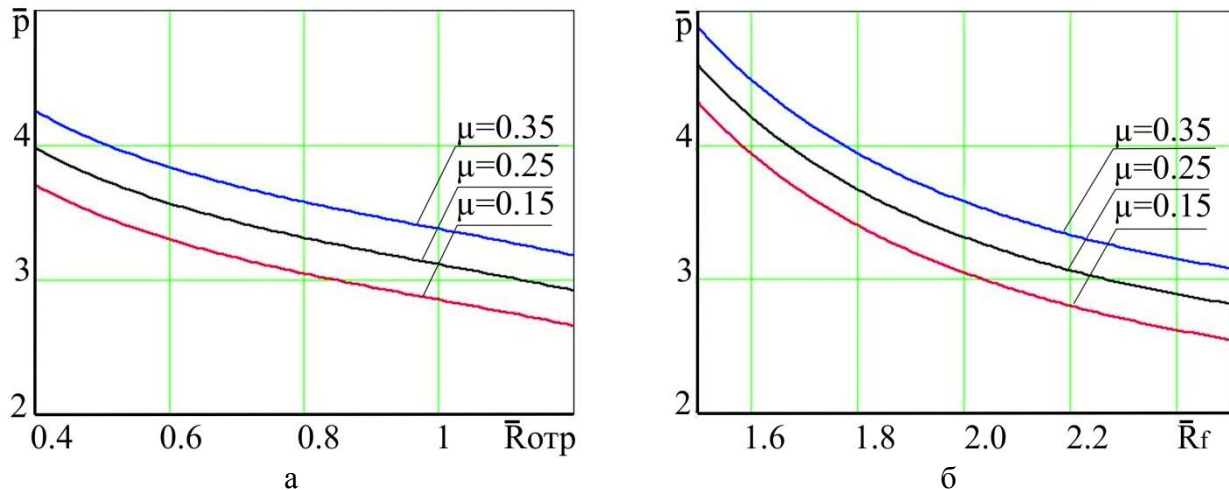


Рис. 2. Графики зависимости приведенного давления от относительного радиуса отростка (а), от относительного радиуса фланца (б)

Результаты моделирования показали, что с изменением выше указанных параметров приведенное давление процесса снижается при разных коэффициентах трения. Данный характер распределения значений связан с изменением величины очага деформации.

Для схемы с вогнутым инструментом аналогично составлены КВПС (табл. 2), значения нормальных компонентов скоростей деформации (табл. 3) и значения тангенциальных компонентов скоростей деформации (табл. 4).

Рассмотрим начальный этап процесса деформирования после калибровки по высоте заготовки для относительно низких заготовок при высоте заготовки менее ее радиуса ( $H_0 < R_0$ ). Все геометрические параметры процесса деформирования выражены в величинах, отнесенных к первоначальному радиусу заготовки  $R_0$ .

Оптимальное значение кинематического параметра  $v_1$ , отвечающее за скорость выхода металла в осевой отросток, с увеличением угла наклона пуансона  $\alpha$  также смещается в сторону увеличения. При этом для  $\alpha = 15^\circ$  не наблюдается выхода металла в осевой отросток ( $v_1 < 0$ ), происходит осадка. Для  $\alpha = 25^\circ$  на начальном этапе процесса деформирования происходит формирование осевого отростка с использованием практически всего объема металла, соответствующего данному шагу деформирования (рис. 3, а).

Таблица 2

КВПС для схемы с вогнутым инструментом

Зона	Скорость $V_z$	Скорость $V_r$
1	$V_{z1} = \frac{2 \cdot V_1 \cdot z}{R_1}$	$V_{r1} = -\frac{V_1 \cdot r}{R_1}$
2	$V_{z2} = \frac{2 \cdot V_1 \cdot h}{R_1}$	$V_{r2} = 0$
3	$V_{z3} = \frac{z}{2 \cdot r \cdot H^2(r)} \cdot H'(r) \times$ $\times [W_1 \cdot (r^2 - R_1^2) - 2 \cdot V_1 \cdot R_1 \cdot h] - \frac{W_1 \cdot z}{H(r)}$	$V_{r3} = \frac{W_1 \cdot (r^2 - R_1^2) - 2 \cdot V_1 \cdot R_1 \cdot h}{2 \cdot r \cdot H(r)}$

Таблица 3

Значения нормальных компонентов скоростей деформации для схемы  
с вогнутым инструментом

Зона	Значение $\dot{\epsilon}$
1	$\dot{\epsilon}_r = \dot{\epsilon}_\theta = -\frac{V_1}{R_1}$
	$\dot{\epsilon}_z = \frac{2 \cdot V_1}{R_1}$
2	$\dot{\epsilon}_r = \dot{\epsilon}_\theta = \dot{\epsilon}_z = 0$
3	$\dot{\epsilon}_z = \frac{H'(r) \cdot [W_1 \cdot (r^2 - R_1^2 - 2 \cdot V_1 \cdot R_1 \cdot h)]}{2 \cdot r \cdot H^2(r)} - \frac{W_1}{H(r)}$
	$\dot{\epsilon}_r = \frac{2 \cdot r \cdot W_1 \cdot r \cdot H(r) - [H(r) + r \cdot H'(r)] \cdot [W_1 \cdot (r^2 - R_1^2) - 2 \cdot V_1 \cdot R_1 \cdot h]}{2 \cdot r^2 H(r)}$
	$\dot{\epsilon}_\theta = \frac{W_1 \cdot (r^2 - R_1^2 - 2 \cdot V_1 \cdot R_1 \cdot h)}{2 \cdot r \cdot H^2(r)}$

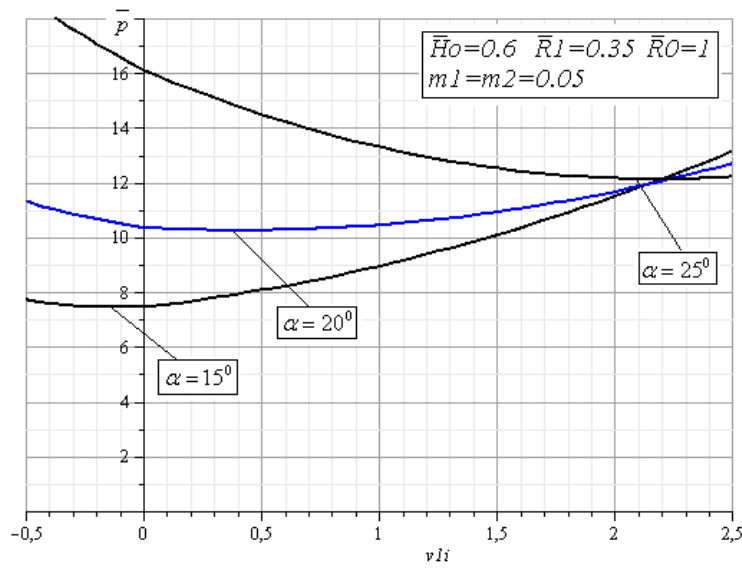
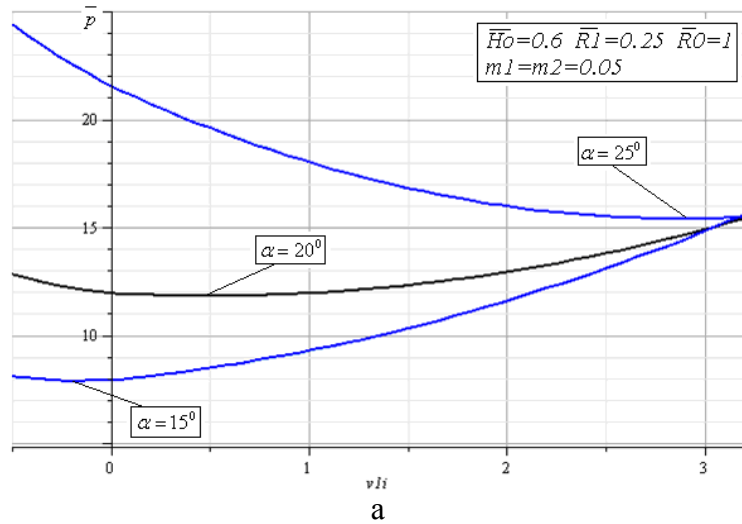
Таблица 4

Значения тангенциальных компонентов скоростей деформации для схемы  
с вогнутым инструментом

Зона	Значение $\dot{\gamma}_{rz}$
1	0
2	0
3	$\frac{z \cdot (-\operatorname{tg} \alpha)}{2 \cdot r^2 \cdot H^3(r)} \cdot \left[ 2 \cdot r^2 \cdot W_1 \cdot H(r) - (H(r) + 2 \cdot r \cdot (-\operatorname{tg} \alpha)) \times \right. \\ \left. \times (W_1 \cdot (r^2 - R_1^2) - 2 \cdot V_1 \cdot R_1 \cdot h) \right] - \frac{W_1 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \alpha}{H^2(r)}$

Аналогичная картина наблюдается и при увеличении относительного диаметра осевого отростка при фиксированном значении диаметра и первоначальной высоте заготовки: для  $\alpha = 15^\circ$  не наблюдается выхода металла в осевой отросток ( $v_1 < 0$ ), для  $\alpha = 20^\circ$  наблюдается формирование осевого и радиального отростков, для  $\alpha = 25^\circ$  происходит формирование осевого отростка с использованием практически всего объема металла, соответствующего данному шагу деформирования (рис. 3, б).

Оптимальное значение кинематического параметра  $v_1$ , а, следовательно, и оптимального значения скорости выхода металла в вертикальном направлении  $v \uparrow = \frac{2h}{R_1} v_1$  с увеличением диаметра осевого отростка при фиксированных значениях остальных геометрических параметров процесса деформирования смещается в сторону уменьшения. При этом для данных соотношений параметров процесса оптимальное значение приведенного давления растет с уменьшением диаметра осевого отростка (рис. 4).



б

Рис. 3. Зависимость величины оптимального приведенного давления  $\bar{p}$  от кинематического параметра  $v_1$  при различных значениях параметра  $\alpha$

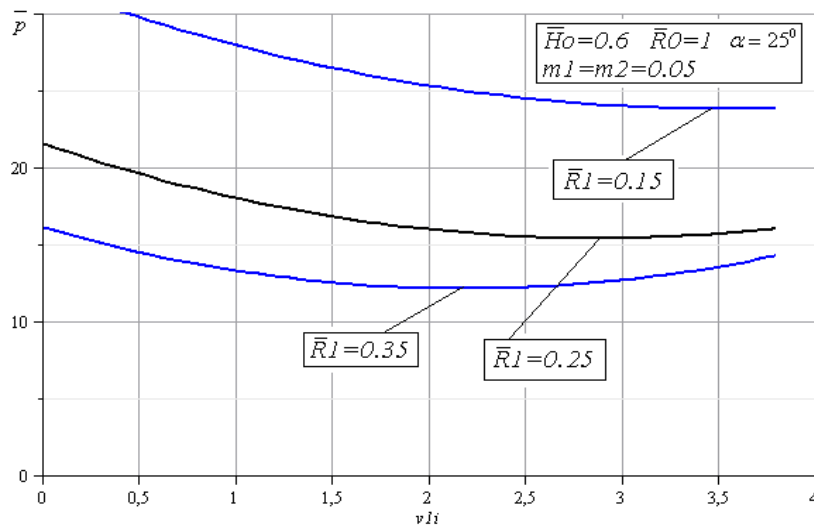


Рис. 4. Зависимость величины оптимального приведенного давления  $\bar{p}$  от диаметра осевого отрезка

Однако для более полной картины влияния величины диаметра осевого отростка на распределение течения металла в вертикальном и радиальном направлении необходимо исследование отношения объема, формирующего осевой отросток к общему объему металла, соответствующему данному шагу деформирования.

Интерес вызывает картина изменения вертикальной и горизонтальной компонент скорости  $v_{z1} = v_{z1}(r, z)$  и  $v_{r1} = v_{r1}(r)$  в пределах трапецидального модуля 1. Поверхности  $v_{z1}(r, z)$  при различных соотношениях геометрических параметров незначительно отличаются при  $r \rightarrow R_1$ , при этом характер изменения  $v_{z1}(r, z)$  не меняется в области, примыкающей к поверхности нижней плиты, вне зависимости от геометрических параметров процесса деформирования (рис. 5).

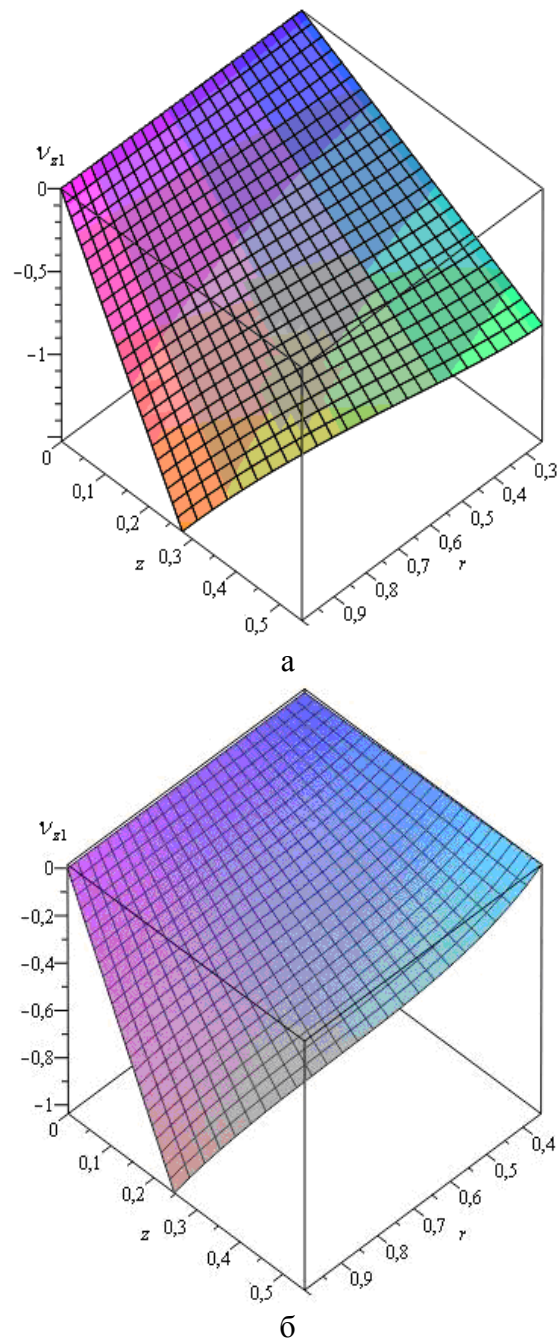


Рис. 5. Зависимость составляющей  $v_{z1}$  трапецидального модуля:  
 а –  $\bar{H}_0 = 0.6$ ;  $\bar{R}_1 = 0.25$ ;  $\bar{R}_2 = 1$ ;  $\alpha = 20^\circ$ ; б –  $\bar{H}_0 = 0.6$ ;  $\bar{R}_1 = 0.35$ ;  $\bar{R}_2 = 1$ ;  $\alpha = 25^\circ$ .

Характер изменения составляющей  $v_{r1} = v_{r1}(r)$  для аналогичных картин изменения  $v_{z1}(r, z)$  параметров процесса позволяет сделать вывод о наличии границы раздела течения металла внутри трапецидального модуля 1 при  $r = 0.44$  (рис. 6, а) и при  $r = 0.97$  (рис. 6, б). При этом для соотношений  $H_0 = 0.6$ ;  $R_1 = 0.35$ ;  $R_2 = 1$ ;  $\alpha = 25^\circ$  практически весь объем металла расходуется на формирование осевого отростка ( $r \rightarrow 1$ ).

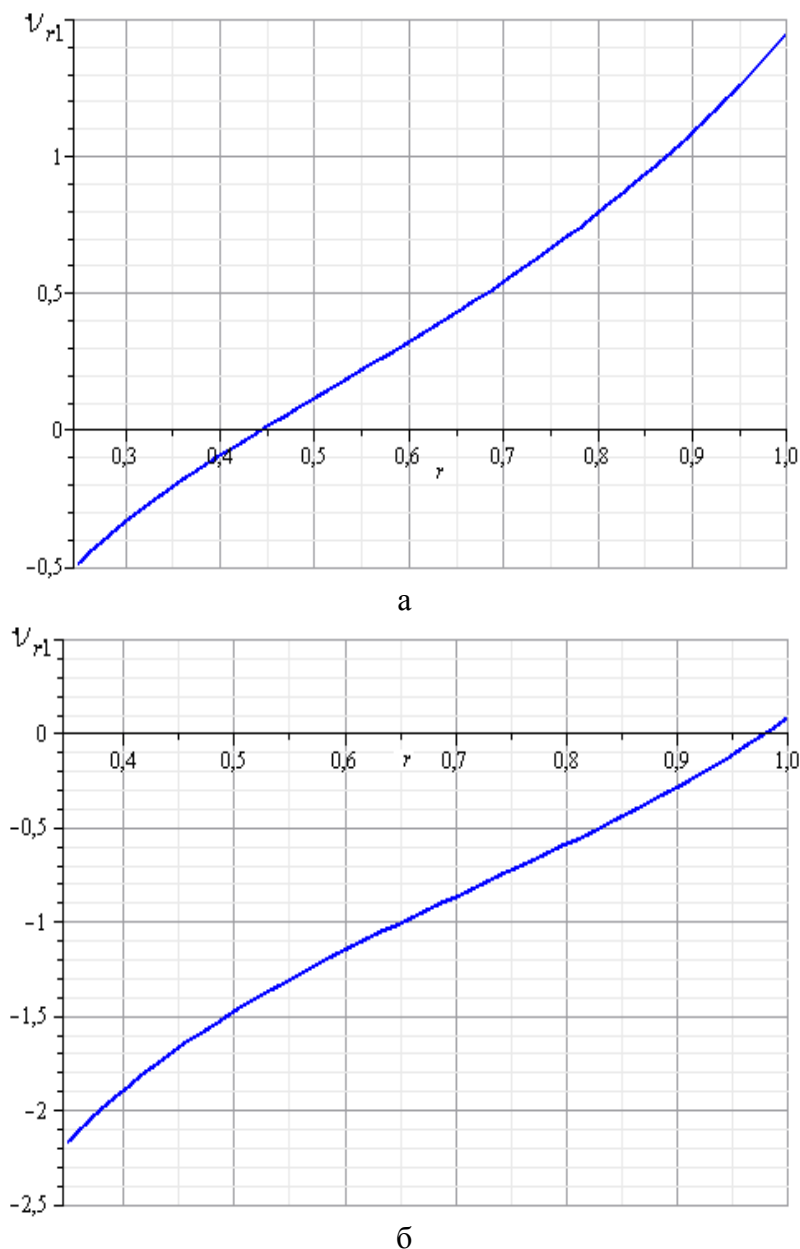
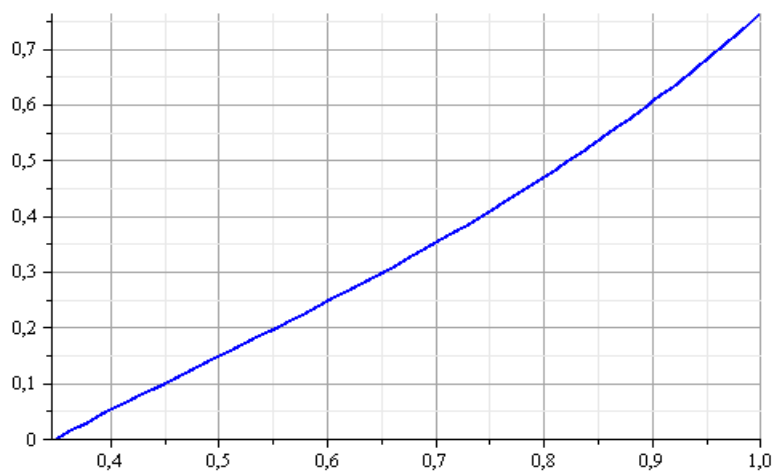


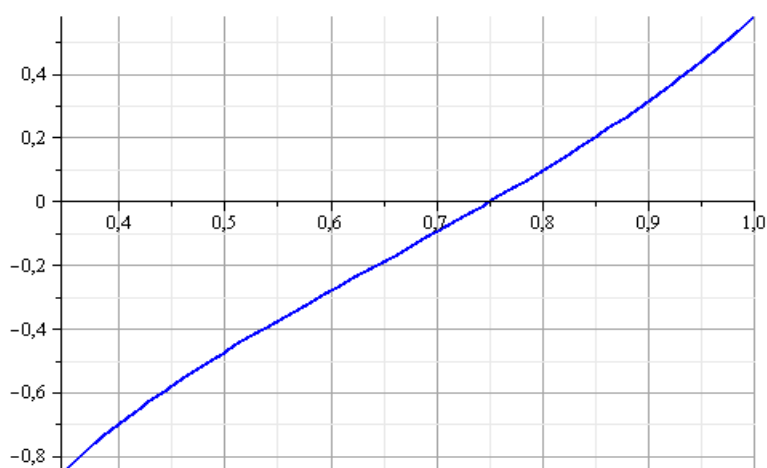
Рис. 6. Зависимость составляющей  $v_{r1}$  трапецидального модуля:  
а –  $\bar{H}_0 = 0.6$ ;  $\bar{R}_1 = 0.25$ ;  $\bar{R}_2 = 1$ ;  $\alpha = 20^\circ$ ; б –  $\bar{H}_0 = 0.6$ ;  $\bar{R}_1 = 0.35$ ;  $\bar{R}_2 = 1$ ;  $\alpha = 25^\circ$ .

Уменьшение первоначальной высоты заготовки при сохранении остальных параметров процесса деформирования ведет к смещению границы раздела течения металла внутри трапецидального модуля 1 от правой его границы к левой, т.е. от практически полного расходования металла на осадку без формирования осевого отростка (рис. 7, а) до центробежно-го течения всего объема металла (рис. 7, в).

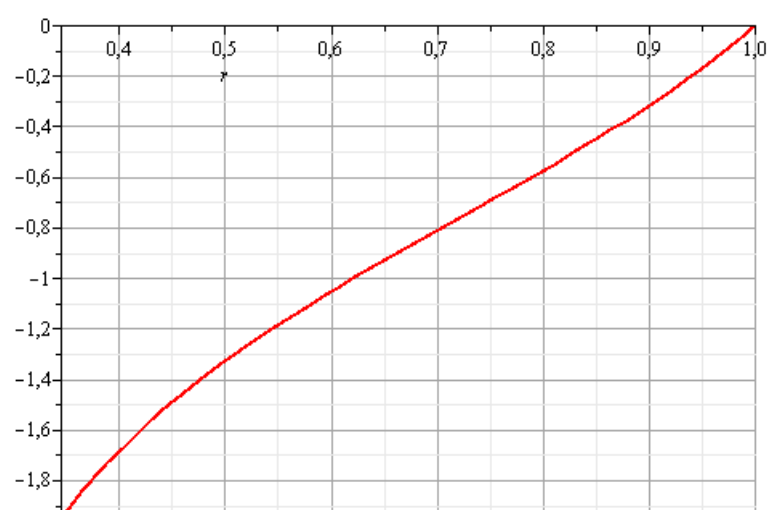




$$a - \bar{H}_0 = 1$$



$$б - \bar{H}_0 = 0.8$$



$$в - \bar{H}_0 = 0.7$$

Рис. 7. Зависимость составляющей  $v_{r1}$  трапецидального модуля при различных значениях первоначальной высоты заготовки для параметров  $\bar{R}_1 = 0.35$ ;  $\bar{R}_2 = 1$ ;  $\alpha = 30^\circ$

Увеличение угла наклона пуансона при сохранении остальных параметров процесса деформирования ведет к смещению границы раздела течения металла внутри трапецидального модуля 1 к его левой границе, т.е. к практически полному расходу металла на формирование осевого отрезка (рис. 8).

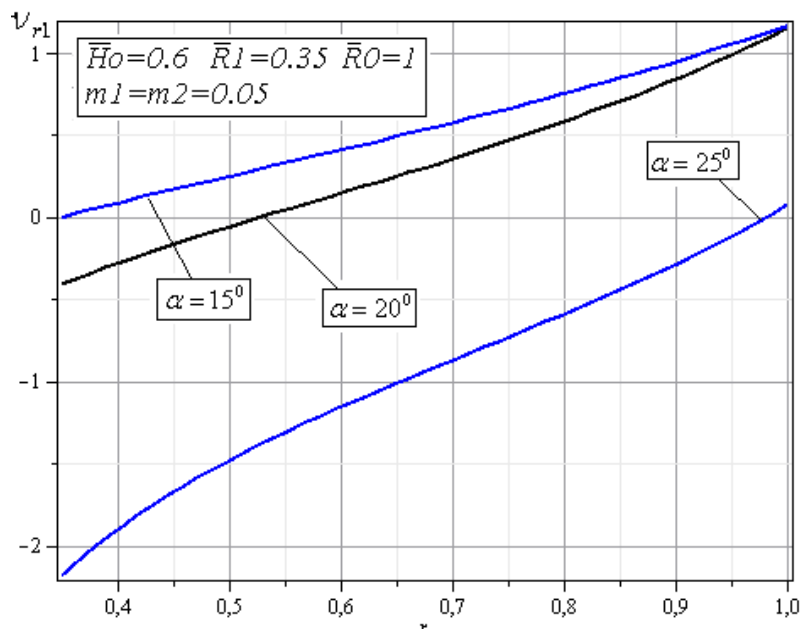


Рис. 8. Зависимость составляющей  $v_{r1}$  трапецидального модуля при различных значениях угла наклона пуансона  $\alpha$

Представленный характер изменения составляющей  $v_{r1}$  трапецидального модуля при различных значениях угла наклона пуансона  $\alpha$  говорит о возможности использования данного технологического параметра как эффективного рычага управления формоизменением полуфабриката в процессе деформирования.

## ВЫВОДЫ

Энергетическим методом баланса мощностей получены расчетные зависимости для определения давления деформирования при комбинированной осадке цилиндрических заготовок инструментом с различным углом наклона рабочей поверхности. Определено влияние параметров процесса на силовой и кинематический режим деформирования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин В. А. Актуальные проблемы холодной и полугорячей объемной штамповки / В. А. Головин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 8. – С.34–35.
2. Алиев И. С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. – №2. – С. 7–10.
3. Алиев И. С. Поиск и классификация новых технологических способов выдавливания / И. С. Алиев // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: темат. Зб. наук. пр. – ДДМА : Краматорськ, 2003. – С. 207–212.
4. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением. – Харьков : Вища школа, 1981. – 248 с.
5. Алиев И. С. Особенности использования энергетического метода в решении технологических задач комбинированного выдавливания / И. С. Алиев, Н. С. Грудкина // II научно-техническая конференция молодых специалистов «Энергомашиспецсталь 2008». – Краматорск, 2008. – С. 28–29.

Статья поступила в редакцию 30.09.2015 г.