

УДК 621.777.4

Алиев И. С.
Грудкина Н. С.**АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАДИАЛЬНО-ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ
ТИПА «СТАКАН С ФЛАНЦЕМ» ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Важнейшей проблемой развития машиностроения в современных условиях является обеспечение конкурентоспособности выпускаемой продукции, обусловленной ее качеством и стоимостью. Перспективным направлением развития ресурсосберегающих технологий пластического деформирования является совершенствование процессов комбинированного выдавливания, позволяющих получать детали более сложной формы при увеличении коэффициента использования металла, уменьшении трудоемкости изготовления за счет снижения числа переходов и повышения точности и эксплуатационной надежности изделий. При этом в энергетическом методе при анализе силового режима ключевое значение имеет подбор подходящих функций, описывающих кинематически возможное поле скоростей (КВПС), удовлетворяющее граничным условиям, условию несжимаемости материала и условию неразрывности нормальных компонент скорости [1, 2]. Следует отметить, что применение метода кинематических элементов позволяет описать сложные схемы течения при помощи элементарных модулей (в основном используют прямоугольные, треугольные и криволинейные модули) [2, 3]. Усложнение геометрии штампуемых деталей, а также сложность поверхностей раздела течения металла внутри самой детали влечёт за собой необходимость исследования возможности использования криволинейных модулей как для анализа силового режима, так и для анализа формоизменения получаемых деталей.

Целью данной работы является проведение теоретического анализа процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей типа «стакан с фланцем» энергетическим методом верхней оценки при помощи криволинейных кинематических модулей, а также анализ поэтапного формоизменения получаемых детали на основе предложенной расчётной схемы.

Исходя из данных по изучению деформированного состояния при комбинированном радиально-обратном выдавливании [4], была выбрана расчётная схема процесса, содержащая криволинейные модули (рис. 1).

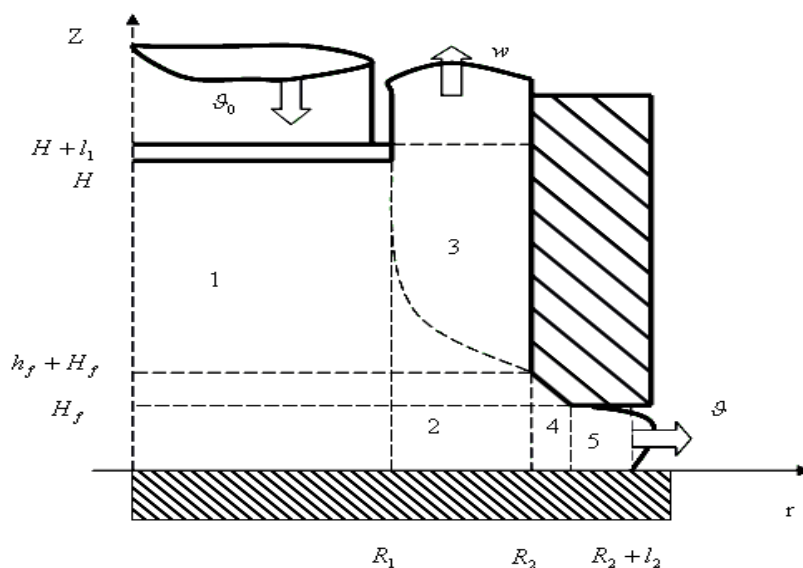


Рис. 1. Схема процесса осесимметричного комбинированного выдавливания

В объёме деформируемой заготовки можно выделить ряд кинематических элементов, внутри которых течение металла приблизительно равномерно. При этом зона 1 является цилиндрической, зона 5 – кольцевой, осевое сечение зоны 4 представляет собой прямоугольную трапецию с боковой стороной $z^*(r) = -r + H_f + h_f + R_2$, осевое сечение зоны 2 представляет собой криволинейную трапецию, ограниченную сверху кривой $z = z(r)$, а осевое сечение зоны 3 представляет собой криволинейный треугольник, ограниченный снизу кривой $z(r) = a \cdot (r - R_i)^2 + b$, представляющей собой однопараметрическое семейство поверхностей вращения с параметром $p = R_i$. В табл. 1 приведены КВПС для каждой из зон, используя следующие обозначения для скоростных параметров:

$$w = \frac{2 \cdot \mathcal{G}_1 \cdot R_1 \cdot (h_f + H_f - H)}{R_2^2 - R_1^2}, \quad \mathcal{G}_1 = \frac{\mathcal{G}_0 \cdot R_1}{2 \cdot H}, \quad w_2 = \frac{2 \cdot \mathcal{G}_1 \cdot R_1 \cdot H - w \cdot (R_1^2 - R_2^2)}{2 R_2 \cdot (H_f + h_f)}$$

Таблица 1

КВПС схемы процесса осесимметричного комбинированного выдавливания

№ модуля	\mathcal{G}_z	\mathcal{G}_r
1.	$-\frac{\mathcal{G}_0}{H} \cdot z$	$\frac{\mathcal{G}_0}{2 \cdot H} \cdot r$
2.	$-\frac{w}{z(r)} \cdot z + \frac{z'(r) \cdot \mathcal{G}_1 \cdot R_1 \cdot H}{r \cdot z^2(r)} \cdot z + \frac{z'(r) \cdot w \cdot (r^2 - R_1^2)}{2 \cdot r \cdot z^2(r)} \cdot z$	$-\frac{w \cdot (R_1^2 - r^2) - 2 \cdot \mathcal{G}_1 \cdot R_1 \cdot H}{2 \cdot r \cdot z(r)}$
3.	$-w$	0
4.	$-\frac{w_2 \cdot R_2 \cdot (H_f + h_f)}{r \cdot z^{*2}(r)} \cdot z$	$\frac{w_2 \cdot R_2 \cdot (H_f + h_f)}{r \cdot z^*(r)}$
5.	0	$\frac{w_2 \cdot R_2 \cdot (H_f + h_f)}{r \cdot H_f}$

Значение мощностей сил деформирования, среза (сдвига) и трения подставляем в уравнение энергетического баланса [5] и получаем:

$$N_a = \sigma_S \cdot \left(\begin{aligned} & \mathcal{G}_0 \cdot \pi \cdot R_1^2 + \iiint_{V_2} \dot{\varepsilon}_{i2} dV_2 + \iiint_V \dot{\varepsilon}_{i4} dV_4 + \frac{4 \cdot \pi}{\sqrt{3}} \cdot w_2 \cdot R_2 \cdot (H_f + h_f) \ln \left| \frac{R_2 + h_f + l_2}{R_2 + h_f} \right| + \frac{\mu \cdot \mathcal{G}_0 \cdot \pi \cdot R_1^2}{H \cdot \sqrt{3}} + \\ & + 2 \cdot \pi \cdot \frac{w \cdot (R_1^2 - R_2^2) - 2 \cdot \mathcal{G}_1 \cdot R_1 \cdot H}{\sqrt{3}} \cdot \ln \left| 1 + \frac{l_2}{R_2} \right| + \frac{\mu}{\sqrt{3}} \cdot \iint_{F_2} U_T dF_2 + \frac{4 \cdot \mu \cdot \pi \cdot l_2}{h \cdot \sqrt{3}} \cdot (-w \cdot (R_1^2 - R_2^2) + 2 \cdot \mathcal{G}_1 \cdot R_1 \cdot H) + \\ & + \frac{4 \mu \cdot w \cdot \pi \cdot R_2 \cdot (H_f + h_f - l_1 - H)}{\sqrt{3}} + \frac{\mu}{\sqrt{3}} \cdot \iint_{F_{3,лев}} U_{Т3,лев} dF_{3,лев} + \frac{8 \cdot \pi \cdot \mu}{\sqrt{3}} \cdot w_2 \cdot \frac{R_2 \cdot (H_f + h_f) \cdot l_2}{H_f} + \\ & + \pi \cdot R_1 \cdot H \cdot \frac{|w - \mathcal{G}_0 - z'(R_1) \cdot \mathcal{G}_1|}{\sqrt{3}} + \frac{8 \cdot \pi \cdot \mu}{\sqrt{3}} \cdot w_2 \cdot R_2 \cdot (H_f + h_f) \ln \left| \frac{H_f + h_f}{H_f} \right| + \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot w_2 \cdot R_2 \cdot (H_f + h_f) + \\ & + \pi \cdot R_2 \cdot (H_f + h_f) \cdot \frac{\left| w - \frac{z'(R_2)}{2 \cdot R_2 \cdot (H_f + h_f)} \cdot (w \cdot (R_2^2 - R_1^2) + 2 \cdot \mathcal{G}_1 \cdot R_1 \cdot H) \right|}{\sqrt{3}} + \iint_{G_{C2-3}} [\mathcal{G}_3 - \mathcal{G}_2] \cdot \sqrt{1 + [z'(r)]^2} dG_{C2-3} \end{aligned} \right)$$

Для вычисления приведенного давления деформирования ($\bar{p} = P/\sigma_S$) используем формулу:

$$\bar{p} = \frac{\sum N_i}{\vartheta_0 F \sigma_S} = \frac{\sum N_i}{\vartheta_0 \cdot \pi \cdot R_1^2 \cdot \sigma_S}.$$

В связи со сложностями интегрирования некоторых составляющих выражения приведенного давления используем численные методы пакета MAPLE 9. Для удобства обработки результатов расчёта все геометрические параметры процесса выражены в долях от R_1 . Варьируемыми параметрами при минимизации величины \bar{p} является R_i – абсцисса, соответствующая вершине кривой $z = z(r)$ и скорость истечения металла в вертикальном направлении w .

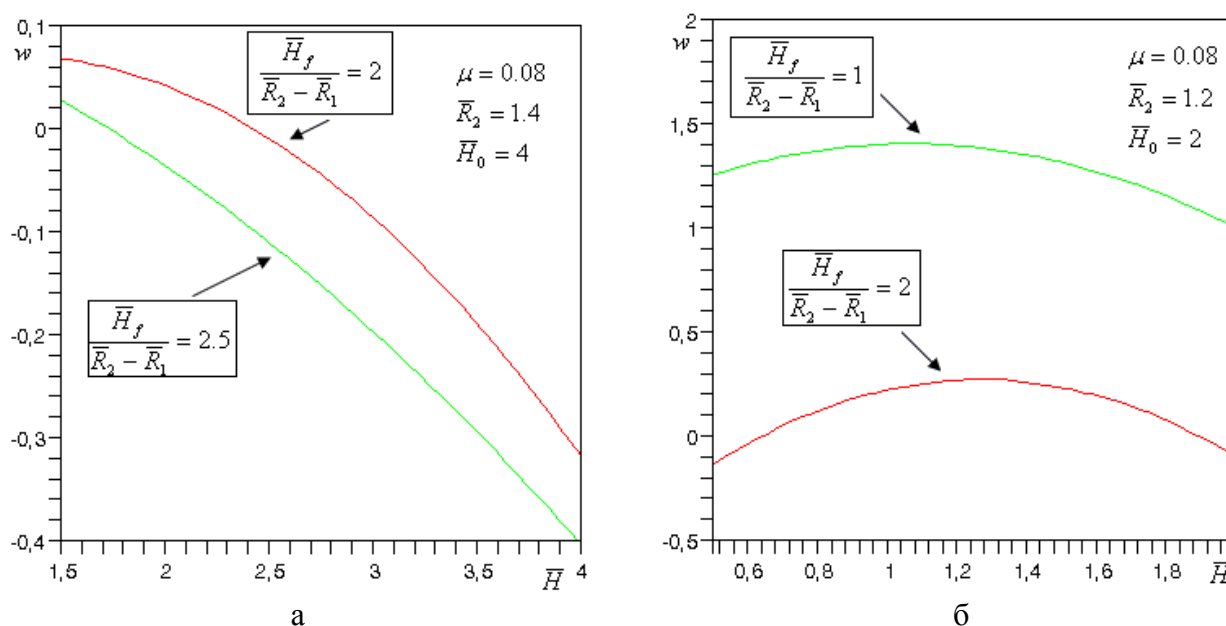


Рис. 2. Зависимости скорости истечения металла w по ходу процесса при различных геометрических соотношениях

Исследование оптимального значения скорости истечения металла в вертикальном направлении w показывают значительное изменение данной величины как по ходу процесса, так и при различных геометрических параметрах процесса. Для относительно невысоких заготовок ($H/R_2 < 2$) при $\frac{\bar{H}_f}{\bar{R}_2 - \bar{R}_1} \leq 1,5$ характерно истечение металла в стенку стакана в противоположном движению пуансона направлении ($w > 0$), причём увеличение отношения $\frac{\bar{H}_f}{\bar{R}_2 - \bar{R}_1}$ приводит к уменьшению значения w . Увеличение толщины стенки стакана при прочих равных параметрах процесса также приводит к уменьшению значения w при всех возможных направлениях истечения металла в стенку стакана (рис. 2).

Используя данные о хорошей интерпретации экспериментального поэтапного и конечного формоизменения программным продуктом *Qform-2D* (рис. 3), сравнение проводилось на его основе.

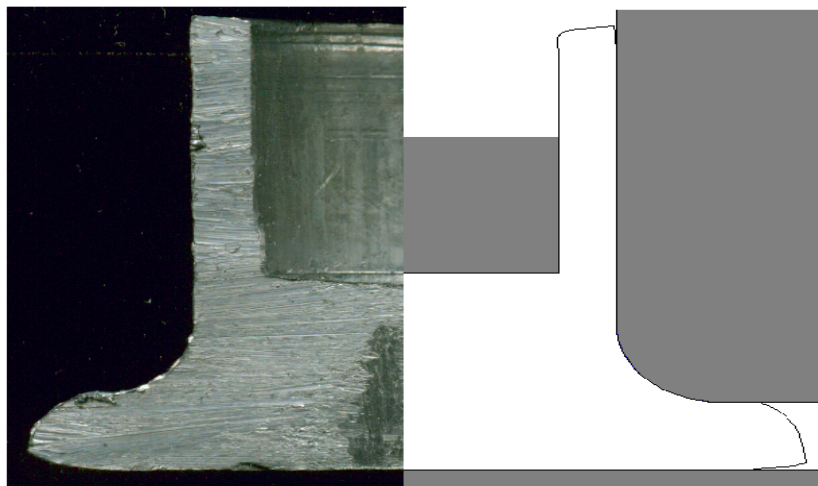


Рис. 3. Сравнение конечного формоизменения детали, полученное на основе *Qform-2D*

Имея оптимальные значения скорости истечения металла в вертикальном направлении w , можно определить приращения заготовки на последовательных стадиях деформирования и прогнозировать формоизменение для процесса в целом (рис. 4).

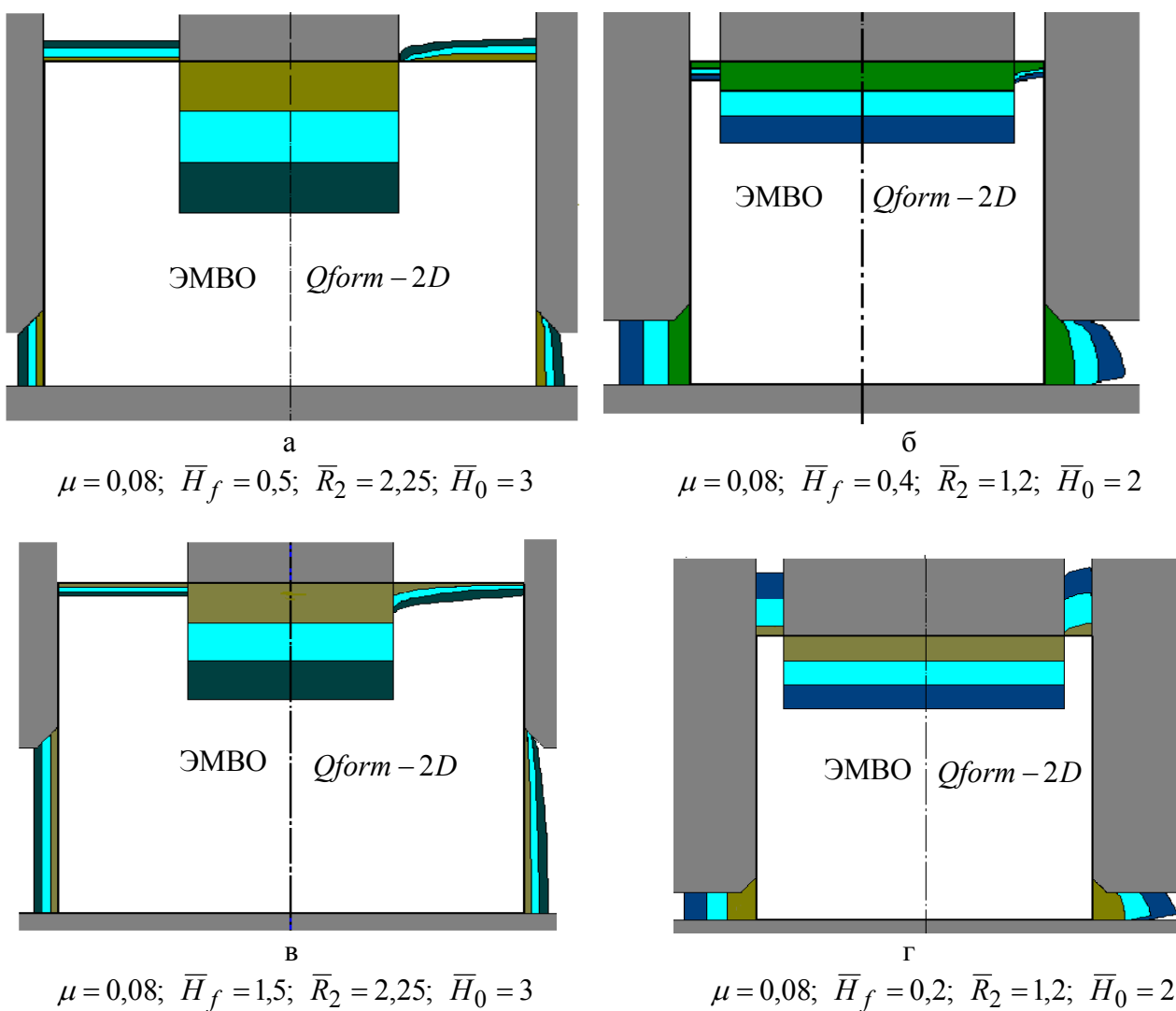


Рис. 4. Изменение геометрии детали по ходу процесса, рассчитанное на основе предложенной расчётной схемы и программного продукта *Qform-2D*

Данные, полученные на основе предложенной расчётной схемы и программного продукта *Qform – 2D*, имеют хорошую сходимость (погрешность не превышает 10–15 % на начальной стадии процесса для относительно невысоких заготовок ($H/R_2 < 2$), в последующем снижаясь к 5–10 %) при различных геометрических параметрах процесса, а также при различных направлениях скоростей истечения металла w . Для высоких заготовок погрешность в определении силовых параметров и скорости истечения металла w увеличивается, что говорит о дополнительном исследовании данного процесса с помощью расчётных схем с разъединённым очагом деформации. Таким образом, предложенная расчётная схема, содержащая криволинейные модули, позволяет рассматривать все возможные случаи истечения металла w (как случай истечения металла в стенку стакана в противоположном движении пуансона направлению, так и случай совпадения направления скорости истечения w с направлением движения пуансона для относительно невысоких заготовок ($H/R_2 < 2$)).

ВЫВОДЫ

При разработке процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания для относительно невысоких заготовок ($H/R_2 < 2$) в качестве расчётной целесообразно использовать предложенную схему деформирования, включающую в себя криволинейные модули. В результате оптимизации возможно определение зависимостей силовых характеристик от геометрических параметров детали и при различных условиях процесса выдавливания, а также прогнозирование формоизменения детали по ходу процесса, (погрешность не превышает 10–15 % на начальной стадии процесса, в последующем снижаясь к 5–10 %) как в случае истечения металла в стенку стакана в противоположном движении пуансона направлению, так и в случае совпадения направления скорости истечения w с направлением движения пуансона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев И. С. *Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания* / И. С. Алиев // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1990. – № 2. – С. 7–9.
2. Алиев И. С. *Моделирование процессов комбинированного выдавливания* / И. С. Алиев, Е. М. Солодун, К. Крюгер // *Механика деформированного твёрдого тела и обработка металлов давлением : сборник научных трудов*. – Тульский гос. унив-т. – Тула, 2000. – С. 21–27.
3. Гридасов В. М. *Совершенствование ресурсосберегающих процессов штамповки полых деталей с фланцем на базе использования технологических способов комбинированного выдавливания* : дис. канд. техн. наук : 05.03.05 / В. М. Гридасов. – Краматорск, 1999. – 214 с.
4. Алиев И. С. *Теоретический анализ процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания* / И. С. Алиев, Н. С. Грудкина // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 55–60.

Алиев И. С. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ОМД ДГМА;
Грудкина Н. С. – аспирант ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: omd@dgma.donetsk.ua