

ограничиваться максимальной величиной растягивающего напряжения на выходе из локального очага пластической деформации, критерием шейкообразования тонкостенной трубной заготовки и допустимой величиной степени использования ресурса пластичности. Этот факт зависит от механических свойств материала цилиндрической заготовки и технологических параметров процесса ротационной вытяжки с утонением.

Установлено, что предельные возможности процесса ротационной вытяжки ε_{np} трубных заготовок из стали 12ХЗГНМФА ограничиваются критерии шейкообразования (рисунок 2 и рисунок 3). При этом использование заготовок из стали 10 ограничивает предельные возможности процесса как по допустимой величине степени использования запаса пластичности ($S < 0,8$ мм/об), так и по максимальной величине растягивающего напряжения на выходе из очага пластической деформации ($S > 0,8$ мм/об) при $\alpha_p = 10^\circ$.

Таким образом, авторами выявлено влияние технологических параметров на величину накопленных микрповреждений и предельные возможности формоизменения по различным критериям разрушения операции ротационной вытяжки с утонением стенки анизотропного материала.

Работа выполнена по государственным контрактам в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 - 2013 годы и грантам РФФИ.

Литература

1. Баркая В.Ф., Рокотян С.Е., Рузанов Ф.И. Формоизменение листового материала. М.: Металлургия. 1976. 294 с.
2. Гредитор М.А. Давильные работы и ротационное выдавливание. М.: Машиностроение. 1971. 239 с.
3. Могильный Н.И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках. М.: Машиностроение. 1983. 190 с.
4. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Ремнев К.С. Ротационная вытяжка с утонением стенки трубных заготовок из анизотропного материала // Кузнечно-штамповочное производство. 2011. №12. С. 10-17.
5. Богатов А. А., Мижирицкий О.И., Смирнов В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984. 144 с.
6. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет (УПИ), 2001. 836 с.
7. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Яковлев С.П. Ротационная вытяжка с утонением стенки осесимметричных деталей из анизотропных трубных заготовок на специализированном оборудовании / Под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 265 с.

Теоретический анализ процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей с фланцем

к.т.н. Алиева Л.И., Грудкина Н.С.
ДГМА, г. Краматорск, Украина
pnir@dgma.donetsk.ua

Анотация. Предложена математическая модель процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей типа стакан с фланцем, позволяющая определять энергосиловые параметры процесса и исследовать поэтапное и конечное формоизменение заготовки. Проведен сравнительный анализ картин поэтапного формоизменения на основе предложенной расчетной схемы, конечно-элементного моделирования и экспериментальных данных.

Ключевые слова: фланец; выдавливание; энергосиловые параметры; формоизменение.

На машиностроительных предприятиях полые детали типа стаканов и втулок с фланцами (корпуса, крепления и т.д.) в основном изготавливаются механической обработкой резанием. Однако получаемые данным способом детали характеризуются пониженными эксплуатационными характеристиками, а процессу их изготовления присущи повышенная трудоемкость и низкий коэффициент использования металла за счет удалений излишков металла в стружку. Альтернативой способам механической обработки являются способы ОМД, особое место среди которых занимает холодная объемная штамповка (ХОШ) [1,2]. К достоинствам данного вида обработки можно отнести благоприятную макроструктуру металла после деформаций за счет его проработки (появляется возможность заменять марки материалов за счет повышения механических характеристик), отсутствие перерезанных волокон и высокий коэффициент использования металла. Недостатком способов холодной штамповки является повышенные нагрузки на инструмент, поэтому актуальным является создание и исследование новых схем штамповки, позволяющих снизить нагрузки на инструмент и расширить номенклатуру штампуемых изделий.

Основными задачами в данном направлении являются разработка и освоение технологических процессов ХОШ с использованием комбинированного выдавливания, имеющим достаточные преимущества по сравнению с простыми схемами деформирования. К характерным особенностям методики расчёта данных технологий следует отнести наличие трудоёмких процедур анализа силового и кинематического режимов процесса. При этом в энергетическом методе верхней оценки (ЭМВО) ключевое значение имеет подбор подходящих функций, описывающих кинематически возможное поле скоростей (КВПС), удовлетворяющее граничным условиям, условию несжимаемости материала и условию неразрывности нормальных компонент скорости [2]. Выбор элементарных составляющих расчетной схемы процесса и ее построение осуществляется исходя из экспериментальных данных и возможности последующего расчета с минимальной трудоемкостью [3-5]. Поэтому построение адекватной расчетной модели, не вызывающей существенного усложнения математического аппарата при расчете энергосиловых параметров процесса, а также характеристик поэтапного формоизменения, является первостепенной задачей исследователя.

Цель работы – теоретический анализ процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей типа стакан с фланцем.

Для достаточно высоких была предложена расчётная схема процесса осесимметричного выдавливания, содержащая трапецеидальный модуль 1 (рисунок 1).

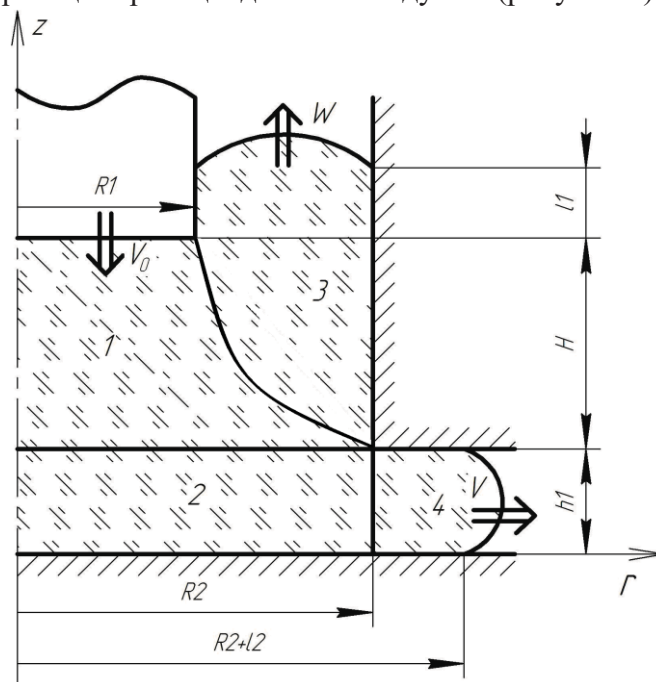


Рисунок 1. Расчётная схема процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания

При этом зона 1 представляет собой усеченный криволинейный конус, зона 2 является цилиндрической, зона 4 – кольцевой, осевое сечение зоны 1 представляет собой прямоугольную криволинейную трапецию, ограниченную справа кривой $T = T(z)$, осевое сечение зоны 3 представляет собой криволинейный треугольник, ограниченный снизу $T = T(z)$. В качестве кривой $T = T(z)$ можно использовать однопараметрические функции, выпуклые вниз (вверх) в пределах использования схемы.

Из всех возможных семейств кривых, обладающих данными свойствами, желательно выбрать те, использование которых при расчете мощностей сил деформирования, среза и трения не приведет к существенному усложнению математического аппарата (в идеале позволит получить энергосиловые параметры в аналитическом виде). В более простом случае можно в качестве $T = T(z)$ выбрать прямую (что существенно упрощает задачу), однако это дает приемлемый результат только при определенном соотношении геометрических параметров процесса [6], что сужает возможность ее использования.

КГУ и КВПС для осесимметричных модулей расчетной схемы с криволинейной границей раздела течения приведены в таблице 1, учитывая следующие обозначения:

$$T = T(z, M), \quad G(r) = T^{-1}(z, M), \quad k = \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1)$$

где M – некоторый параметр варьирования;

$G(r)$ - обратная относительно $T = T(z, M)$ функция.

Таблица 1

КГУ и КВПС для осесимметричных модулей расчетной схемы

№ модуля	КГУ	КВПС модуля
1	$v_{z1} \Big _{z=H+h_1} = -V_0, \quad v_{r1} \Big _{r=0} = 0$ $v_{z1} \Big _{z=h_1} = -\frac{(V_0+W)R_1^2}{R_2^2} + W$	$\begin{cases} v_{z1} = -\frac{(V_0+W)R_1^2}{T^2(z)} + W, \\ v_{r1} = -\frac{r}{T^3(z)}(V_0+W)kR_1^2 \end{cases}$
2	$v_{z2} \Big _{z=h_1} = -\frac{(V_0+W)R_1^2}{R_2^2} + W$ $v_{z2} \Big _{z=0} = 0, \quad v_{r2} \Big _{r=0} = 0$ $v_{r2} \Big _{r=R_2} = \frac{1}{2R_2 h_1} \left((V_0+W)R_1^2 - WR_2^2 \right)$	$\begin{cases} v_{z2} = \left(-\frac{(V_0+W)R_1^2}{R_2^2} + W \right) \cdot \frac{z}{h_1}, \\ v_{r2} = \frac{r}{2h_1} \left(\frac{(V_0+W)R_1^2}{R_2^2} - W \right) \end{cases}$
3	-	$\begin{cases} v_{z3} = W, \\ v_{r3} = 0 \end{cases}$
4	$v_{r3} \Big _{r=R_2} = \frac{1}{2R_2 h_1} \left((V_0+W)R_1^2 - WR_2^2 \right)$	$\begin{cases} v_{z4} = 0, \\ v_{r4} = \frac{1}{2r h_1} \left((V_0+W)R_1^2 - WR_2^2 \right) \end{cases}$

Следует отметить тот факт, что наибольшую трудоемкость в расчетах энергосиловых параметров вызывает расчет мощности сил деформирования в модуле 1. Таким образом, желательно получить интенсивность скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_i$ в пределах данного модуля в

Таблица 2

Значение скоростей деформации $\dot{\varepsilon}_z, \dot{\varepsilon}_r, \dot{\varepsilon}_\theta, \dot{\gamma}_{rz}$ и интенсивности скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_i$ для кинематических модулей расчетной схемы

№ модуля	Значения $\dot{\varepsilon}_z, \dot{\varepsilon}_r, \dot{\varepsilon}_\theta, \dot{\gamma}_{rz}$ и $\dot{\varepsilon}_i$
1	$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_{z1} = 2 \frac{C_I k}{T^3(z)}, \quad \dot{\varepsilon}_{r1} = -\frac{C_I k}{T^3(z)}, \\ \dot{\varepsilon}_{\theta 1} = -\frac{C_I k}{T^3(z)}, \quad C_I = (V_0 + W) R_I^2, \\ \dot{\gamma}_{rz1} = -\frac{r C_I}{T^4(z)} \left(T''(z) T(z) - 3 [T'(z)]^2 \right), \\ \dot{\varepsilon}_{i1} = \frac{C_I}{T^3(z)} \sqrt{12 [T'(z)]^2 + r^2 \left(T''(z) T(z) - 3 [T'(z)]^2 \right)^2}. \end{cases}$
2	$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_{z2} = \left(-\frac{(V_0 + W) R_I^2}{R_2^2} + W \right) \frac{1}{h_1}, \\ \dot{\varepsilon}_{r2} = \frac{1}{2h_1} \left(\frac{(V_0 + W) R_I^2}{R_2^2} - W \right), \quad \dot{\varepsilon}_{\theta 2} = \frac{1}{2h_1} \left(\frac{(V_0 + W) R_I^2}{R_2^2} - W \right), \\ \dot{\gamma}_{rz2} = 0, \quad \dot{\varepsilon}_{i2} = \left(\frac{(V_0 + W) R_I^2}{R_2^2} - W \right) \frac{1}{h_1}. \end{cases}$
3	$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_{z3} = \dot{\varepsilon}_{r3} = \dot{\varepsilon}_{\theta 3} = \dot{\gamma}_{rz3} = 0, \\ \dot{\varepsilon}_{i3} = 0. \end{cases}$
4	$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_{z4} = 0, \quad \dot{\varepsilon}_{r4} = \frac{-1}{2r^2 h_1} \left((V_0 + W) R_I^2 - W R_2^2 \right), \\ \dot{\varepsilon}_{\theta 4} = \frac{1}{2r^2 h_1} \left((V_0 + W) R_I^2 - W R_2^2 \right), \quad \dot{\gamma}_{rz4} = 0, \\ \dot{\varepsilon}_{i4} = \frac{1}{\sqrt{3} r^2 h_1} \left((V_0 + W) R_I^2 - W R_2^2 \right) \end{cases}$

Полагая $\dot{\gamma}_{rz1} = -\frac{r C_I}{T^4(z)} \left(T''(z) T(z) - 3 [T'(z)]^2 \right) \rightarrow 0$, мы практически

исключаем влияние сдвиговой деформации, что не соответствует действительности и дает весомую погрешность как при определении энергосиловых параметров процесса, так и при исследовании поэтапного формоизменения заготовки. В качестве альтернативы можно предложить следующий вариант замены выражения сдвиговой деформации на более «удобную» в плане последующего использования функцию. Пусть семейство кривых, обладающих необходимыми нам свойствами, будет удовлетворять дифференциальному уравнению:

$$T''(z)T(z) - 3[T'(z)]^2 = 2MT'(z)T(z). \quad (2)$$

Полагая $T'(z) = p$, $T''(z) = p'p$, можно понизить порядок данного дифференциального уравнения и привести его к линейному уравнению вида:

$$p' - \frac{3p}{T(z)} = 2M. \quad (3)$$

Общее решение после соответствующих преобразований имеет вид:

$$p = C_I^* T(z) \left(T^2(z) - \frac{M}{C_I^*} \right) \text{ или } T'(z) = C_I^* T(z) \left(T^2(z) - \frac{M}{C_I^*} \right).$$

Разделяя переменные и интегрируя, получаем:

$$\int \frac{dT(z)}{T(z) \left(T^2(z) - \frac{M}{C_I^*} \right)} = C_I^* \int dz. \quad (4)$$

Полагая $\frac{M}{C_I^*} > 0$, получаем после преобразований:

$$T^2(z) = \frac{M}{C_I^* \left(1 - \frac{1}{C_2^*} e^{2Mz} \right)}. \quad (5)$$

Учитывая дополнительные условия для данного семейства кривых (дают возможность определить C_I^* и C_2^*) и условные обозначения:

$$T(h_1) = R_2, T(H + h_1) = R_1, A = R_1 R_2 \sqrt{1 - e^{2MH}}, B = R_2^2 - R_1^2 e^{2MH}, C = R_2^2 - R_1^2$$

можно представить полученное ранее решение в виде:

$$T(z) = A \left[B - C e^{2M(z-h_1)} \right]^{-1/2}. \quad (6)$$

Таким образом, можно учесть влияние сдвиговых деформаций, при этом незначительно усложнить вычисления составляющих уравнения баланса мощностей, получив возможность варьирования параметра $M \in (-\infty, 0) \cup (0, +\infty)$.

Получаем составляющие для расчета энергосиловых параметров процесса:

$$N_{d2} = \sigma S \pi \left((V_0 + W) R_1^2 - W R_2^2 \right) \quad (7)$$

$$N_{d4} = \frac{2\sigma S \pi}{\sqrt{3}} \left((V_0 + W) R_1^2 - W R_2^2 \right) \ln \left(\frac{R_2 + l_2}{R_2} \right). \quad (8)$$

Модуль 3 является жестким, следовательно, $N_{d3} = 0$.

$$\begin{aligned}
N_{d1} = & \left(\begin{aligned} & \sigma_S 2\pi \int_0^{R_1} r dr \int_{h_1}^{h_1+H} \frac{C_1}{T^3(z)} \sqrt{12[T'(z)]^2 + r^2 \left(T''(z)T(z) - 3[T'(z)]^2 \right)^2} dz + \\ & + \sigma_S 2\pi \int_{R_1}^{R_2} r dr \int_{h_1}^{G(r)} \frac{C_1}{T^3(z)} \sqrt{12[T'(z)]^2 + r^2 \left(T''(z)T(z) - 3[T'(z)]^2 \right)^2} dz = \\ & = \left[T''(z)T(z) - 3[T'(z)]^2 = 2MT'(z)T(z), \quad C_1 = (V_0 + W)R_1^2 \right] = \\ & = \sigma_S 2\pi \int_0^{R_1} r dr \int_{h_1}^{h_1+H} \frac{-2C_1 k}{T^3(z)} \sqrt{3+r^2 k^2} dz + \sigma_S 2\pi \int_{R_1}^{R_2} r dr \int_{h_1}^{G(r)} \frac{-2C_1 k}{T^3(z)} \sqrt{3+r^2 k^2} dz = \\ & = 2\pi \sigma_S C_1 \left(\begin{aligned} & \frac{1}{3k^2} \left(\frac{1}{R_1^2} \left(3+R_1^2 k^2 \right)^{3/2} - \frac{1}{R_2^2} \left(3+R_2^2 k^2 \right)^{3/2} - 3\sqrt{3} \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) \right) + \\ & + \sqrt{3+R_1^2 k^2} - \sqrt{3+R_2^2 k^2} + \sqrt{3} \ln \left(\frac{R_2 \left(\sqrt{3+R_1^2 k^2} + \sqrt{3} \right)}{R_1 \left(\sqrt{3+R_2^2 k^2} + \sqrt{3} \right)} \right) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) \quad (9)
\end{aligned}$$

$$N_{c1-2} = \frac{\pi \sigma_S}{3\sqrt{3}h_1} \left| \begin{aligned} & V_0 R_1^2 \left(\frac{R_2 M (R_2^2 - R_1^2)}{R_1^2 (1 - e^{2MH})} \cdot 2h_1 + R_2 \right) + \\ & + W \left(\frac{R_2 M (R_2^2 - R_1^2)}{(1 - e^{2MH})} \cdot 2h_1 + R_2 (R_1^2 - R_2^2) \right) \end{aligned} \right| \quad (10)$$

$$N_{c2-4} = \frac{\pi \sigma_S R_2 h_1}{\sqrt{3}} \left(\frac{(V_0 + W)R_1^2}{R_2^2} - W \right) \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
N_{c1-3} = & \frac{2\pi \sigma_S}{\sqrt{3}} (V_0 + W) R_1^2 \left[\begin{aligned} & \frac{1}{AM} \left(\begin{aligned} & \frac{(R_2 - R_1) \sqrt{1 - e^{2MH}}}{2} + \frac{\sqrt{B}}{2} \ln \left| \frac{R_2 \sqrt{1 - e^{2MH}} - \sqrt{B}}{R_2 \sqrt{1 - e^{2MH}} + \sqrt{B}} \right| + \\ & + \frac{\sqrt{B}}{2} \ln \left| \frac{R_1 \sqrt{1 - e^{2MH}} + \sqrt{B}}{R_1 \sqrt{1 - e^{2MH}} - \sqrt{B}} \right| \end{aligned} \right) + \\ & + AM \left(\begin{aligned} & - \frac{1}{R_2 \sqrt{1 - e^{2MH}}} + \frac{1}{R_1 \sqrt{1 - e^{2MH}}} + \\ & + \frac{B}{3} \left(\frac{1}{\left(R_2 \sqrt{1 - e^{2MH}} \right)^3} - \frac{1}{\left(R_1 \sqrt{1 - e^{2MH}} \right)^3} \right) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right] \quad (12)
\end{aligned}$$

$$N_{t2-0} = \frac{2\pi\mu_2\sigma S}{3\sqrt{3}} \left((V_0 + W)R_1^2 - WR_2^2 \right) \frac{R_2}{h_1} \quad (13)$$

$$N_{t4-0}^{H+6} = \frac{4\pi\mu_2\sigma S}{\sqrt{3}} \left((V_0 + W)R_1^2 - WR_2^2 \right) \frac{l_2}{h_1} \quad (14)$$

$$N_{t3-0} = \frac{4\pi\mu_1\sigma S R_2}{\sqrt{3}} |W|(H + l_1) \quad (15)$$

$$N_{t3-1} = \frac{4\pi\mu_1\sigma S R_1}{\sqrt{3}} (\Delta H_X + l_1)(V_0 + W). \quad (16)$$

Полученные значения мощностей сил деформирования, среза (сдвига) и трения (7) - (16) подставляем в уравнение энергетического баланса:

$$pFV_0 = \left(N_{d1} + N_{d2} + N_{d4} + N_{c1-2} + N_{c1-3} + N_{c2-4} + N_{t2-0} + N_{t4-0}^{H+6} + N_{t3-0} + N_{t3-1} \right). \quad (17)$$

Разделив правую и левую части выражения (17) на $\sigma_s FV_0$ и учитывая элементарные преобразования, можно получить формулу для вычисления безразмерной величины приведенного

давления $\bar{p} = \bar{p}(\bar{W}, \bar{M})$, где $\bar{W} = \frac{W}{V_0}$, $\bar{W} \in \left[-1, \frac{l}{\bar{R}_2^2 - 1} \right]$ и

$\bar{M} = MR_1$, $\bar{M} \in (-\infty, 0) \cup (0, +\infty)$. Следует отметить тот факт, что $\bar{p} = \bar{p}(\bar{W}, \bar{M})$ является линейной функцией относительно кинематического параметра \bar{W} , поэтому его оптимальное значение находим, используя равенство нулю выражения N_{c1-2} :

$$V_0 R_1^2 \left(\frac{R_2 M (R_2^2 - R_1^2)}{R_1^2 (1 - e^{2MH})} \cdot 2h_1 + R_2 \right) + W \left(\frac{R_2 M (R_2^2 - R_1^2)}{(1 - e^{2MH})} \cdot 2h_1 + R_2 (R_1^2 - R_2^2) \right) = 0. \quad (18)$$

Отсюда

$$W_{opt} = -V_0 \frac{R_2 M (R_2^2 - R_1^2) 2h_1 + R_2 R_1^2 (1 - e^{2MH})}{R_2 M (R_2^2 - R_1^2) 2h_1 + R_2 (R_1^2 - R_2^2) (1 - e^{2MH})}. \quad (19)$$

Подставив полученное оптимальное значение скорости истечения металла в вертикальном направлении, можно получить силу деформирования P или безразмерную величину давления \bar{p} как функций одного параметра M или \bar{M} . Используя эту возможность, мы существенно упрощаем определение оптимальных параметров процесса в используемых программных продуктах и пакетах, таких как Maple 12 и другие.

Характер изменения величины \bar{p} по ходу процесса при различных значениях высоты фланца соответствует действительности: увеличение высоты фланца ведет к снижению величины приведенного давления при сохранении остальных параметров процесса, увеличение толщины стенки стакана за счет увеличения диаметра заготовки ведет к увеличению величины \bar{p} при сохранении остальных параметров процесса (рисунок 2 а, б).

Изменение скорости истечения металла в вертикальном направлении $W_{opt} \uparrow$ по ходу

процесса также является одной из важных характеристик, позволяющих оценить поэтапное формоизменение и сделать вывод о возможности использования данной расчетной схемы. Характер изменения $W_{opt} \uparrow$ соответствует действительности: увеличение высоты фланца ведет к снижению величины $W_{opt} \uparrow$ (при $\bar{h}_1 = 0.6$ эта величина принимает отрицательные значения – идет захват металла в сторону движения пуансона) при сохранении остальных параметров процесса (рисунок 2 в). Характер изменения $W_{opt} \uparrow$ при увеличении толщины стенки стакана за счет увеличения диаметра заготовки при сохранении остальных параметров процесса представлен на рисунок 2 г.

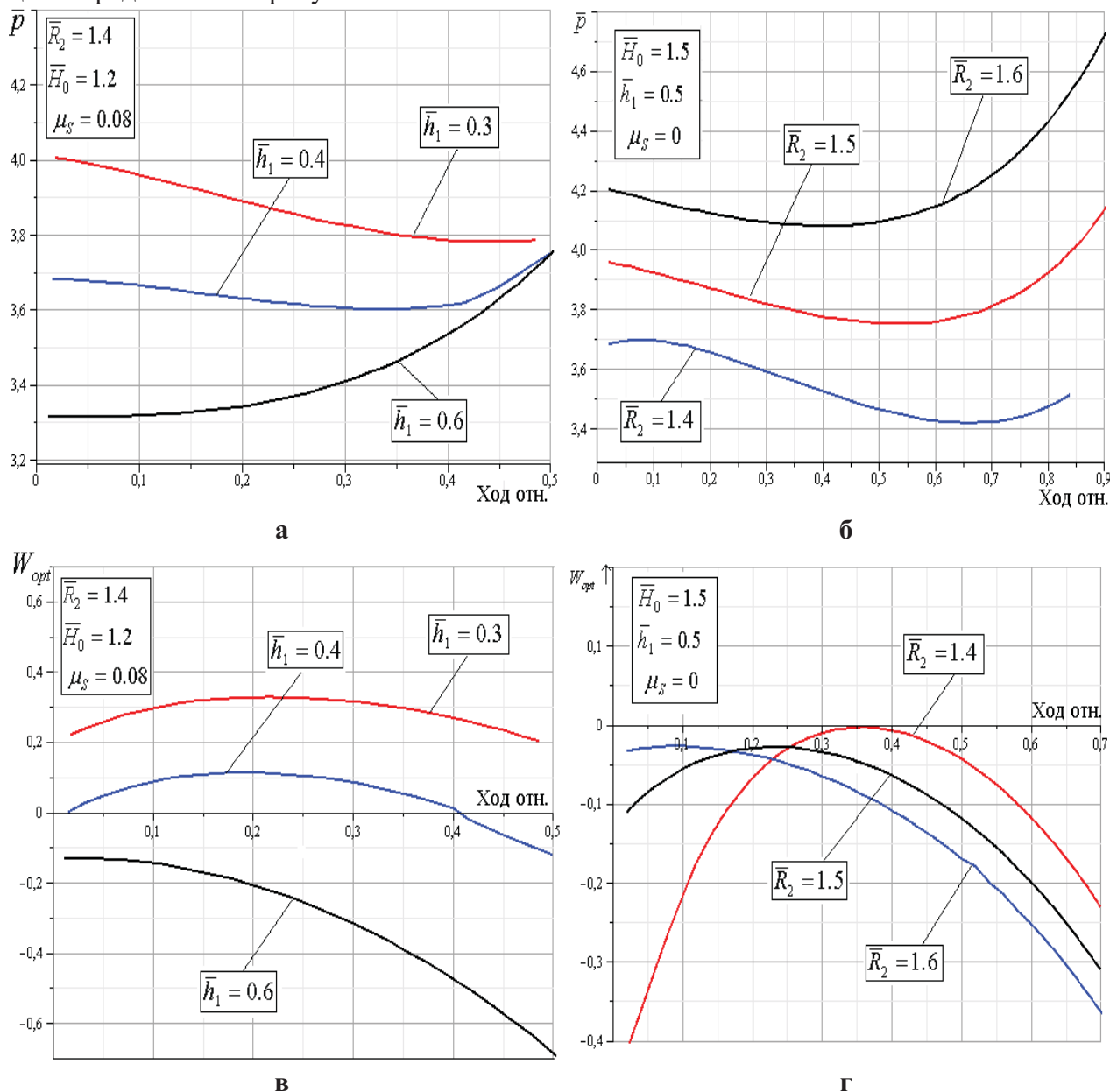


Рисунок 2. Графики зависимости приведенного давления \bar{p} и скорости истечения металла в вертикальном направлении $W_{opt} \uparrow$ по ходу процесса

Следует отметить тот факт, что данная схема процесса может быть использована при соотношении геометрических параметров процесса, характерных для течения металла в вертикальном направлении, соответствующем направлению хода пуансона (с высотой фланца более толщины стенки стакана, т.е. в случае преимущественного радиального течения металла).

Используя экспериментальные данные по формоизменению детали из материала Л62 (

$R_1 = 10.5$, $R_2 = 14$, $H_0 = 17$, $h_1 = 5.6$, $H_x = 3.7$, $\mu_s = 0.08$), моделирование в пакете QForm 2D и теоретическое исследование (ЭМВО) на основе предложенной расчетной схемы, были получены сведения об изменении геометрии полуфабриката по ходу процесса (рисунки 3 а, б). Сопоставление полученных результатов показывает расхождение приращений полуфабриката в вертикальном направлении $\Delta l_1 \uparrow$ по ходу процесса, не превышающее 15-20% с тенденцией к уменьшению с увеличением хода.

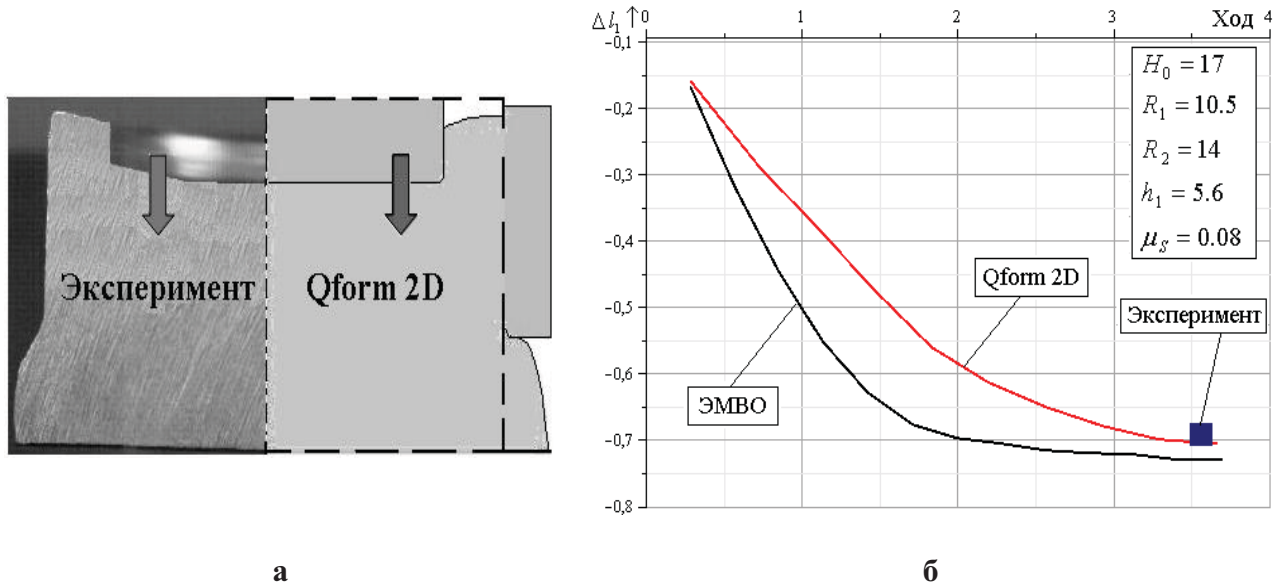


Рисунок 3. Приращение полуфабриката в вертикальном направлении $\Delta l_1 \uparrow$ по ход процесса

Выводы

Предложена расчетная схема процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей типа стакан с фланцем для случая преимущественного радиального течения металла. Сравнение картин формоизменения, полученных на основе эксперимента, ЭМВО и Qform2D, позволяют сделать вывод о возможности использования данной расчетной схемы как для расчета энергосиловых параметров процесса, так и для оценки формоизменения (расхождение приращений полуфабриката в вертикальном направлении $\Delta l_1 \uparrow$ по ходу процесса, не превышающее 15-20% с тенденцией к уменьшению с увеличением хода).

Литература

1. Алиев И.С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания / И.С. Алиев // Кузнечно – штамповочное производство. -1990. - №2. – С. 7 – 9.
 2. . Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением / Л.Г. Степанский. – М.: Машиностроение, 1979. – 215 с.
 3. Алиев И.С., Моделирование процессов комбинированного выдавливания / И.С. Алиев, Солодун Е.М., Крюгер К. // Механика деформированного твёрдого тела и обработка металлов давлением. Сборник научных трудов. – Тульский гос. унив-т. Тула, 2000, С.21-27.
 4. Алиева Л.И. Комбинированное выдавливание полых деталей с фланцем / Л.И. Алиева, Р.С. Борисов, Я.Г. Жбанков, Б.С. Мороз // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. Тематичний зб. наук. пр., Краматорськ, 2008. - С.45-48.
 5. Алиев И.С. Теоретический анализ процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания / И.С. Алиев, Н.С. Грудкина // Обработка материалов давлением. – 2008. – №1 (19). - С. 55-60.
 6. Алиева Л.И. Моделирование процесса комбинированного радиально-обратного выдавливания деталей типа стакан с / Л. И. Алиева, Н. С. Грудкина // ISSN 2079-5459. Вісник НТУ «ХПІ». 2012. №47 (953) – С. 3 – 9.
- УДК 621.777.4.001.8