

## СТРУКТУРНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ КАК ОБЪЕКТА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

*В.Е. Лысов, Е.С. Каплун*

Самарский государственный технический университет  
443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрен процесс изготовления объемных деталей методом глубокой вытяжки. Разработана структурная схема процесса как объекта системы автоматического управления.*

**Ключевые слова:** глубокая вытяжка, передаточная функция, модель процесса.

Для изготовления баллона автомобильного порошкового огнетушителя ОП-2(з)-АВСЕ используют технологию глубокой вытяжки [1]. Из круглой плоской металлической заготовки получают полуфабрикат в виде стакана диаметром 110 мм и высотой 135 мм. В результате пайки двух одинаковых стаканов образуют колбу огнетушителя требуемого размера. Каждый стакан получается путем глубокой вытяжки в два перехода. Это объясняется тем, что за один переход при сохранении напряжений в металле на допустимом уровне не удастся вытянуть нужную высоту стакана. Окончательное качество полуфабриката определяется на втором переходе, где формируются конечные геометрические размеры и качество детали. При большой степени деформации металла и малой толщине (0,5 мм) исходного материала возникают неблагоприятные напряженно-деформируемые состояния. На характер распределения напряжений влияет ряд факторов: упрочнение металла, изменение силы трения при прижатии заготовки, изменение силы вытяжки при изгибе и сопряжении элементов заготовки при втягивании ее в матрицу, стремлении формирования недопустимого гофрированного образования, изменения толщины металла в местах перехода донной части к боковой стенке и у торца изделия и ряд других неучтенных факторов. Указанные факторы могут привести к возникновению в процессе вытяжки с постоянной скоростью недопустимых усилий, что приведет к возникновению брака – раз-

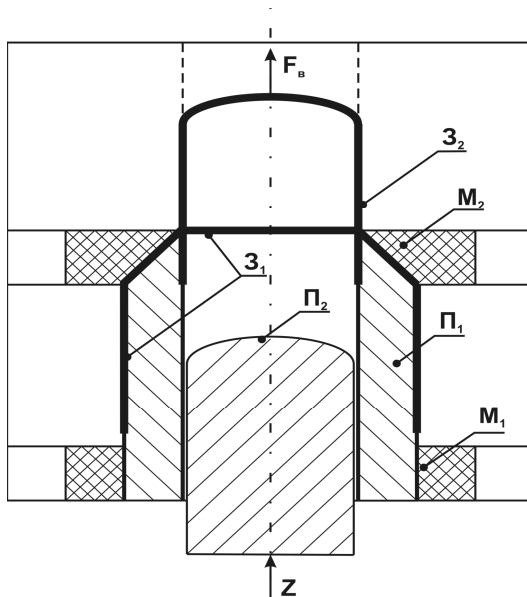


Рис. 1. Схема процесса вытяжки:  
П<sub>1</sub> – пуансон первой вытяжки; П<sub>2</sub> – пуансон второй вытяжки; М<sub>1</sub> – матрица первой вытяжки; М<sub>2</sub> – матрица второй вытяжки; З<sub>1</sub> – заготовка после первой вытяжки; З<sub>2</sub> – заготовка после второй вытяжки

рыва металла, трещин. Это ведет к безвозвратной потере как материала, энергии, так и других производственных затрат. Стремление совместить высокую производительность оборудования и стабилизацию усилия вытяжки на предельно допустимом уровне приводит к необходимости регулирования скорости движения пуансона на втором переходе.

Схематично процесс вытяжки на втором переходе показан на рис. 1. Заготовка в виде стакана 3 после первого перехода находится между поршнем 1 и матрицей первого перехода  $M_1$  и имеет силу прижатия  $F_{2пр}$ . Под действием усилия  $F_B$ , развиваемого поршнем  $П_2$  в направлении  $Z$ , заготовка 3 втягивается в матрицу  $M_2$ , которая и формирует конечные геометрические параметры детали, а ход поршня  $П_2$  по оси  $Z$  определяет высоту детали. Скорость движения поршня определяется величиной расхода рабочей жидкости, подаваемой в цилиндр поршня  $П_2$ .

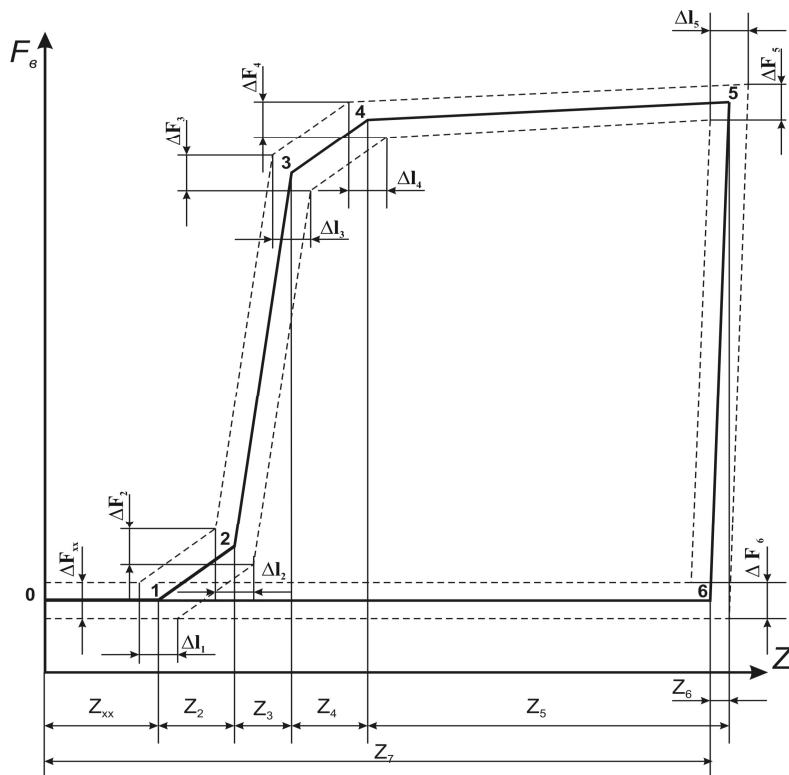


Рис. 2. Диаграмма формирования усилия вытяжки

Для построения структурной схемы объекта управления и разработки его математического описания необходимо рассмотреть физические процессы, имеющие место при глубокой вытяжке. Процесс представим в виде изображающей траектории в системе координат  $ZOF$  (рис. 2). Упомянутая плоскость определяет геометрию изделия, характеризует напряженно-деформированное состояние в ходе процесса и определяет структуру алгоритма управления процессом. В силу сложности процесса невозможно представить его в аналитической форме, а поэтому фазовая траектория строится на основании статистической обработки результатов экспериментальных данных, полученных в условиях крупносерийного выпуска деталей. Диаграмма содержит следующие участки:  $Z_{xx}$  – участок прямого холостого хода, определяется конструкцией пресса;  $Z_2$  – процесс натягивания заготовки на дно пуансона и прида-

ния формы торцевой части детали;  $Z_3$  – процесс начала втягивания пуансона с заготовкой в матрицу  $M_2$ . Участок характеризуется резким возрастанием усилия противодействия  $F_3$  при незначительном перемещении пуансона. При втягивании пуансона на всю длину  $Z_4$  матрицы происходит возрастание усилия до  $F_4$  при сохранении предельно допустимого растягивающего напряжения. После прохождения матрицы  $M_2$  усилие вытяжки возрастает незначительно – до величины  $F_5$  на участке  $Z_5$ . Участок  $Z_6$  определяет разгрузку пуансона после останова до значения  $F_{XX}$ . Участок  $Z_7$  описывает обратный ход пуансона в исходное положение. На диаграмме отмечены технологические допуски как по отклонению перемещения  $Z_i$  в виде  $\Delta l_i$ , так и по отклонению усилия вытяжки  $\Delta F_i$ . Для обеспечения устойчивости и повторяемости процесса глубокой вытяжки необходимо гарантировать расположение изображающей траектории каждой реализации процесса в границах, предписанных согласно траектории в плоскости ZOF.

На основе описанных процессов составляется структурная схема объекта управления процессом глубокой вытяжки совместно с электрогидропневматической аппаратурой, обеспечивающей реализацию процесса. На первом участке при формировании дна изделия наряду с упругопластическими деформациями металла происходит упругая реакция на пуансон. Это отражено на рис. 3 в виде передаточной функции  $W_{y1}(p)$  [3]:

$$W_{y1}(p) = \frac{z_2^*(p)}{F_2(p)} = \frac{k_{y1}}{T_{1y}^2 p^2 + 2c_1 T_{1y} p + 1}. \quad (1)$$

В (1) принято:  $T_{1y}^2 = m_1 c_1$ ;  $2T_{1y} c = \beta_1 / c_1$ ;  $K_{y1} = 1 / c_1$ ;  $C_1$  – жесткость материала на растяжение;  $\beta_1$  – коэффициент диссипативности;  $m_1$  – эквивалентная масса заготовки;  $Z_2$  – упругая деформация заготовки.

Скорость движения пуансона задается гидрораспределителем с передаточной функцией  $W_3(p)$

$$W_3(p) = \frac{Q_{22}(p)}{Z_{zol}(p)} = K_3. \quad (2)$$

Здесь  $Q_{22}$  – расход рабочей жидкости, поступающий в гидроцилиндр пуансона;  $Z_{zol}$  – перемещение штока золотника. Упомянутая связь безынерционна.

Связь между перемещением золотника реализуется следящим электропневмопозиционером с передаточной функцией  $W_1(p)$

$$W_1(p) = \frac{Z_{zol}(p)}{U_y(p)} = \frac{K_1}{T_1 p + 1}. \quad (3)$$

В (3) обозначено:  $T_1 = K_1 K_2$  – постоянная времени устройства;  $K_1$  – коэффициент передачи пневмоцилиндра;  $K_2$  – коэффициент передачи в цепи обратной связи.

На перемещение золотника оказывает влияние усилие со стороны золотника. Это отображается на схеме в виде колебательного звена с передаточной функцией  $W_2(p)$ :

$$W_2(p) = \frac{z_{zol}^*(p)}{F_{zol}(p)} = \frac{K_2}{T_2^2 p^2 + 2c T_2 p + 1}. \quad (4)$$

В формуле обозначено:  $T_2^2 = m_{zol} c_{zol}$ ;  $2T_2 c = \beta_{zol} / c_{zol}$ ;  $K_2 = 1 / c_{zol}$ ;  $m_{zol}$  – эквивалентная масса золотника с учетом воздействия рабочей жидкости;  $\beta_{zol}$  – коэффициент диссипативности;  $C_{zol}$  – жесткость к перемещению золотника.

Расход рабочей жидкости  $Q_{22}$ , поступающей в цилиндр исполнительного меха-

низма, обеспечивает скорость движения пуансона [2] согласно передаточной функции  $W_4(P)$ :

$$W_4(p) = \frac{V_2(p)}{Q_{22}(p)} = \frac{1}{S_2} = K_4. \quad (5)$$

Здесь  $S_2$  – площадь поршня пуансона.

Преобразование скорости движения пуансона в его перемещение определяется интегрирующим звеном в виде передаточной функции  $W_5(P)$

$$W_5(p) = \frac{Z(p)}{V_2(p)} = \frac{1}{p} \quad (6)$$

Усилие вытяжки изменяется от величины силы  $Q_{np}$  прижатия до максимального значения  $F_{B,max}$  определенного допустимым напряжением.

Допустимое усилие вычисляется по зависимости [1]

$$F_{B,max} = 2\pi[r_2 - r_n(1 - \sin \alpha)]S\sigma_{max} \sin \alpha. \quad (7)$$

В (7) принято:  $\alpha$  – угол заготовки относительно матрицы в процессе вытяжки;  $r_n$  – радиус округления торца матрицы;  $r_2$  – радиус детали.

В процессе вытяжки радиус детали  $R$  также меняется по зависимости

$$R = r_2 - r_n(1 - \sin \alpha). \quad (8)$$

Таким образом, усилие вытяжки меняется от усилия холостого хода до максимального, равного сумме усилия прижатия и максимального при вытяжке.

В результате формирования  $F_B$  возникает давление в цилиндре пуансона  $P_B$ , которые связаны передаточной функцией  $W_6(P)$ :

$$W(p) = \frac{P(p)}{F(p)} = \frac{1}{S} = K. \quad (9)$$

Возникающее давление создает противоток  $Q_{22}^*$ , который должен быть равным  $Q_{22}$  при завершении процесса. Этот процесс описывает передаточная функция  $W_7(P)$ :

$$W_7(p) = \frac{Q_{22}^*(p)}{P_B(p)} = K_7. \quad (10)$$

При реализации процесса глубокой вытяжки в гидросистеме имеют место высокие давления (свыше 100 атм); при наличии гибких шлангов передачи давления от насоса к гидрораспределителям возникает запаздывание в исполнении команды управления. На структурной схеме рис. 3 это учтено звеном с запаздыванием и представлено передаточной функцией  $W_8(P)$ :

$$W_8(p) = \frac{Q_{22}(p)}{Q_{22}^*(p)} = e^{-p\tau}, \quad (11)$$

где  $\tau$  – время запаздывания.

После достижения заданного хода пуансона и давления, меньшего максимально допустимого, происходит остановка пуансона. В случае, если при движении пуансона усилие вытяжки достигает предельно допустимого значения раньше при меньшем значении заданного хода пуансона, также происходит остановка процесса.

По представленной методике, полученным передаточным функциям, диаграмме процесса проведен его анализ. Численные значения промышленного прессы:

$F_2 = 1500$  кг;  $F_3 = 9000$  кг;  $F_4 = 11000$  кг;  $F_5 = 12000$  кг;  $Q_2 = 598,5$  см<sup>3</sup>/сек;  
 $P_B = 126,3$  кг/см<sup>2</sup>;  $U_y = 10$  В;  $K_2 = 10$ ;  $K_I = 1$  см/с. В;  $Z_{30Л} = 10,5$  мм (1,05 см);  
 $C_{30Л} = 100$  кг/см;  $C_I = 10^7$  кг/м;  $\beta_{30Л} = \beta_I = 100$  кг с/м;  $\tau = 0,15$  с,  $Z_2 = 15$  мм,  $Z_3 = 3$  мм,  
 $Z_4 = 20$  мм (значения определены размерами матрицы);  $Z_5 = 98$  мм,  $h_M = 20$  мм.

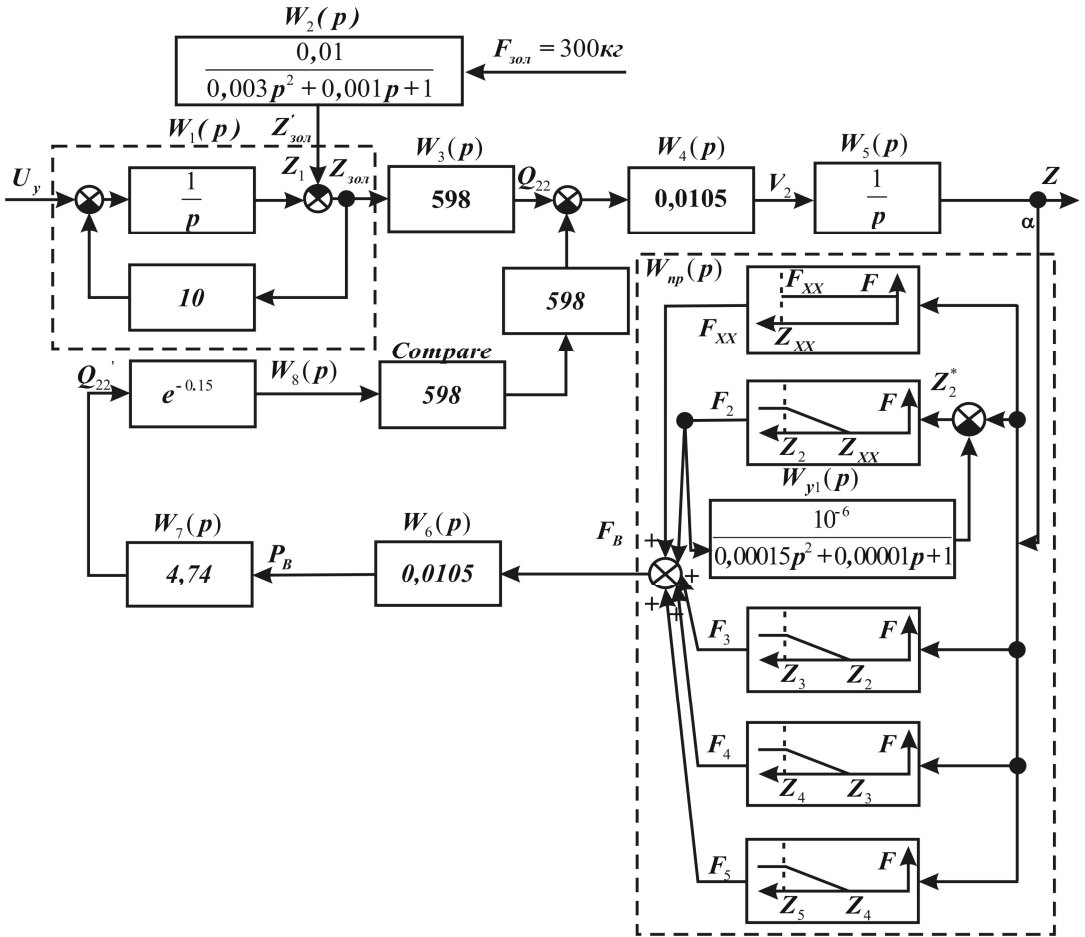


Рис. 3. Структурная схема объекта управления

Моделирование по схеме рис. 3 проводилось в среде Matlab. Результат представлен на рис. 4.

Кривая 1 (см. рис. 4) является эталонной. Кривая 2 получена в случае увеличения усилия в зоне вхождения в матрицу на 500 кг. Кривая 3 характеризует процесс в случае снижения усилия вытяжки на 500 кг. Из кривой 2 следует, что в системе возможен обрыв заготовки и при достижении 12000 кг произойдет остановка прессы.

Анализ показывает, что действие помех приводит к отклонению процесса от эталонного значения. Для поддержания усилия вытяжки на уровне эталонной изображающей траектории и тем самым обеспечения требуемых показателей качества, предъявляемых к детали, необходимо разрабатывать САУ стабилизации усилия вытяжки за счет управления скоростью процесса.

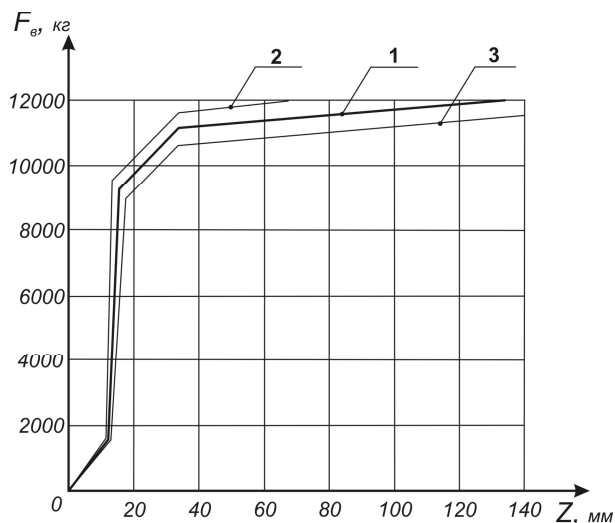


Рис. 4. Характеристика процесса вытяжки:  
 1 – эталонная характеристика; 2 – характеристика при положительном воздействии;  
 3 – характеристика при отрицательном воздействии

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю.* Технология холодной штамповки. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. – М.: Альянс, 2011. – 423 с.
3. *Лысов В.Е.* Теория автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.

*Статья поступила в редакцию 14 января 2013 г.*

## STRUCTURAL AND GRAPHICAL REPRESENTATION OF THE PROCESS OF DEEP DRAWING AS AN OBJECT OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

***V.E. Lysov, E.S. Kaplun***

Samara State Technical University  
 244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*The process model of making three-dimensional parts by deep drawing has been investigated. The block Diagram has been elaborated as the object of the automatic control system.*

**Keywords:** *process of deep drawing, function bloc diagram, transfer function.*

---

*Vladimir E. Lysov (Dr .Sci. (Techn.)), Professor.  
 Evgeny S. Kaplun, Postgraduate Student.*