

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ТРУБ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

А.В. Выдрин, Я.И. Космацкий, Б.В. Баричко

MATHEMATICAL MODELING OF THE PRESSING PROCESS OF PIPES OF VARYING SECTION

A.V. Vydrin, Ya.I. Kosmatsky, B.V. Barichko

Представлена постановка задачи математического исследования процесса прессования труб переменного сечения. Разработана математическая модель определения усилия прессования при использовании специфической профилировки прессового инструмента, позволяющая прогнозировать возможность изготовления труб заданного сортамента и определять рациональную форму прессового инструмента. Представлены результаты численного исследования процесса прессования с использованием полученной модели.

Ключевые слова: прессование металлов, параметры пресс-иглы, толщина стенки трубы, очаг деформации, моделирование, усилие прессования.

The paper presents a statement of the problem of mathematical study of pressing process of pipes of varying section. A mathematical model is developed for defining the effort of pressing when a specific calibration of pressing tool is used allowing to predict the possibility of manufacturing pipes of the set assortment and to define the rational form of pressing tool. Results of numerical research of pressing process by means of the obtained model are presented.

Keywords: pressing of metals, press needle parameters, pipe wall thickness, deformation center, modeling, effort of pressing.

Основным параметром, определяющим возможность протекания процесса прессования в стабильных условиях, является максимальное усилие прессования, возникающее в процессе деформации.

При проектировании нового технологического режима прессования труб переменного сечения с утонённой стенкой на заднем участке, важнейшим ограничением является уровень предельно допустимых нагрузок на деформирующий инструмент прессов, входящих в прессовую линию, что объясняется изменением толщины стенки в процессе прессования от номинального до минимального значения. Поэтому очень важно точно прогнозировать величину максимального усилия, возникающего в процессе деформации металла.

Характер течения металла при прессовании определяется рядом факторов, главными из которых являются: калибровка матрицы (H_M, H_{TM}, ω) и пресс-иглы ($D_{ИГ\max}, D_P, L_{ИГ\max}, L_{Ц}, L_P$), положение и форма границ пластического очага деформации ($R_1, R, r_1, r, \theta, \beta, \gamma$), режимы прессования ($v_{П}, \lambda_i$), условия трения на контактных поверхностях (τ_S, μ), механические свойства исследуемого металла (σ_S) и другие. Действия этих факторов определяют структуру моделируемой системы, свойства ее элементов и причинно-

следственные связи, присущие системе и существенные для достижения цели моделирования.

В соответствии с основным законом теории пластических деформаций о течении металла в направлениях наименьшего сопротивления в процессе распрессовки заготовка (D_0, d_0, h_0) под влиянием силового воздействия P пресс-шайбы осаживается и увеличивается в диаметре (D_K). Одновременно или несколько позже в зависимости от отношения величины поперечных сечений заготовки и пресс-изделия, длины заготовки и других деформационных условий начинается заполнение прессуемым металлом канала матрицы. Непосредственно с этого момента начинается процесс выдавливания трубы в отверстие одноканальной конической матрицы – стадия прессования трубы.

Для математического описания процесса прессования и решения соответствующей задачи, были приняты следующие основные допущения: деформируемый металл идеально пластичный ($\tau_S = \sigma_S / \sqrt{3}$) и несжимаем ($\xi_{xx} + \xi_{yy} + \xi_{zz} = 0$); температура пластической горячей деформации в процессе прессования не изменяется ($\Delta t = 0$); деформация осесимметричная ($x_{ij} = y_{ij}$); силы контактного трения постоянны и не зависят от нормальных давлений ($\tau_K = \mu \tau_S$); температурные на-

пряжения и деформации, силы инерции и другие массовые силы пренебрежимо малы.

Математическое описание процесса прессования труб переменного сечения осуществлялось в прямоугольной пространственной системе координат. В связи с тем, что в течение основной стадии процесса различные участки выпрессовываемого металла находятся в различных напряженно-деформированных состояниях, претерпевают упругие или пластические деформации, было произведено условное разделение на несколько характерных блоков в соответствии с расчетной схемой, представленной на рис. 1.

В соответствии с рис. 1, границами блоков с соответствующими им параметрами зон пластической деформации при осесимметричном прессовании и выполнении условия несжимаемости являются сферы.

Следует отметить, что одними из характерных, влияющих на условия и результаты прессования, являются зоны 6 и 9, находящиеся вблизи матрицы. Металл в этих зонах на рассматриваемой стадии в истечении не участвует или почти не уча-

ствует и образует объемы пластически недеформирующегося, находящегося в упругом состоянии металла [1, 2].

В очаге деформации, ограниченном блоками 2, 3 и 4, скорость течения металла в некоторой точке по оси z зависит не только от координаты данной точки z , но и от ее положения по оси x . Следовательно, скорость линейной деформации ξ_{zz} не является постоянной величиной по объему металла. Поэтому для математического описания процесса были определены средние значения скорости линейной деформации $\xi_{zz\text{ ср}}$, которые являются средними между скоростью линейной деформации на границах очага деформации, т. е. на границе контакта металла с пресс-иглой и застойной зоной металла:

$$\xi_{zz\text{ ср}2} = \frac{1}{2} v_{\Pi} (\lambda_2 - 1) \times \left(\frac{\cos \theta}{R \cos \gamma - R_1 \cos \varphi} + \frac{\cos \alpha}{L_{\text{ИГ max}}} \right), \quad (1)$$

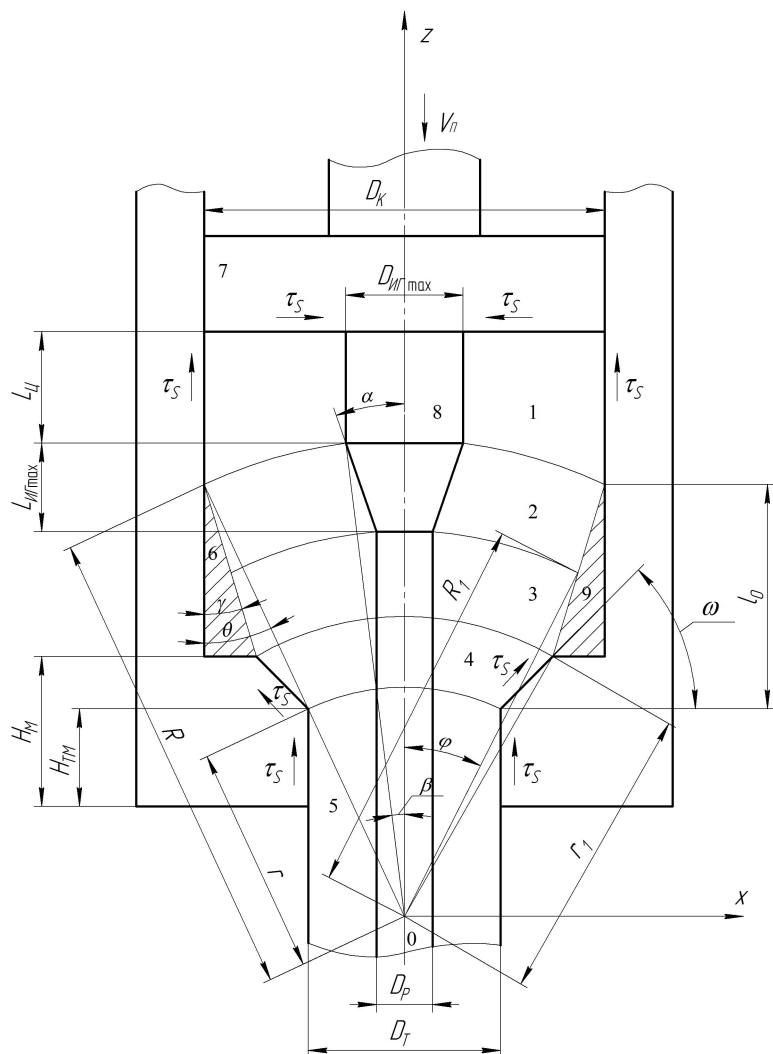


Рис. 1. Расчётная схема процесса на стадии прессования с геометрическими граничными условиями

$$\xi_{zz \text{ cp3}} = \frac{1}{2} \lambda_2 v_{\Pi} (\lambda_3 - 1) \times \left(\frac{1}{R \cos \beta - L_{\text{ИГmax}} - \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{D_p}{2}\right)^2}} + \frac{\cos \theta}{R_1 \cos \varphi - R \cos \gamma + l_0 - (H_M - H_{\text{TM}})} \right), \quad (2)$$

$$\xi_{zz \text{ cp4}} = \frac{1}{2} \lambda_2 \lambda_3 v_{\Pi} (\lambda_4 - 1) \times \left(\frac{1}{\sqrt{r_1^2 - \left(\frac{D_p}{2}\right)^2} - \sqrt{r^2 - \left(\frac{D_p}{2}\right)^2}} + \frac{\cos \omega}{R \cos \gamma - l_0 + (H_M - H_{\text{TM}}) - r \cos \gamma} \right). \quad (3)$$

Уравнение баланса мощностей для случая горячего прессования труб с использованием пресс-иглы с коническим участком включает в себя мощность сил деформирования N_P с приложением усилием пресса, мощности сил формоизменения заготовки N_{Φ} , мощность N_{Δ} , развиваемую максимальными касательными напряжениями на всех поверхностях разрывов скоростей S_{Δ} в заготовке и мощность сил контактного трения N_{τ} . В общем виде уравнение баланса мощностей представляет собой выражение следующего вида:

$$N_P = \tau_S \left(\iiint_{V_2} H_2 dV_2 + \iiint_{V_3} H_3 dV_3 + \iiint_{V_4} H_4 dV_4 \right) +$$

$$+ \iint_{S_{\Delta}} \tau_S |\Delta v| dS + \iint_{S_K} \tau_K v_c dS, \quad (4)$$

где τ_S – сопротивление металла на сдвиг; τ_K – силы контактного трения на единицу поверхности контакта; S_K – площадь контакта; v_c – средняя скорость скольжения по поверхности контакта; H_2, H_3, H_4 – интенсивность скоростей деформаций сдвига в соответствующих блоках; V_2, V_3 и V_4 – объемы металла соответствующих блоков; Δv – разница касательных скоростей к поверхности разрыва перед поверхностью разрыва и за ней; σ_S – сопротивление металла пластической деформации.

Путем преобразований уравнения баланса мощностей, с учетом всех переменных параметров, получена зависимость для определения усилия прессования, возникающего при изготовлении труб с уменьшением толщины стенки на заднем участке, представленная в общем виде:

$$P = \frac{N_{\Phi}}{v_{\Pi}} + \frac{\pi}{\sqrt{3}} \sigma_S \left(\frac{1}{4} C + \mu B \right), \quad (5)$$

где μ – коэффициент трения скольжения; v_{Π} – скорость прессования; B, C – переменные параметры мощности сил контактного трения и мощности, развиваемой максимальными касательными напряжениями на поверхностях разрывов скоростей S_{Δ} в заготовке соответственно.

Представленная математическая модель (5) была использована для численного исследования влияния изменения величины максимального диаметра пресс-иглы на значение величины усилия прессования. Параметры процесса прессования труб с применением пяти различных профилировок пресс-игл, при неизменных остальных параметрах, представлены в таблице.

Параметры прессования труб Ø89×12 мм переменного сечения из стали марки 08Х18Н10Т

Минимальная толщина стенки трубы (h_{Tmin}), мм	11,0	10,0	9,0	8,0	7,0
Размеры заготовки ($D_0 / d_0 \times h_0$), мм	191 / 77 × 474				
Геометрические параметры профилировки пресс-иглы, мм	$L_{\text{ИГmax}} / L_{\text{Ц}} / L_P$				
	30 / 100 / 1370				
	$D_{\text{ИГmax}}$				
	69,20	71,20	73,20	75,20	77,20
Диаметр втулки контейнера (D_K), мм	195				
Геометрические параметры матрицы	H_{TM} / H_M , мм				
	14 / 25				
	ω , град				
	45				
Коэффициент вытяжки (λ), мм/мм	9,16	9,87	10,58	11,30	12,0
Температура прессования (t_{Π}), °C	1180				
Скорость прессования (v_{Π}), мм/с	220				
Коэффициент трения скольжения (μ)	0,035				
Сопротивление металла пластической деформации (σ_S), МПа	161,9	161,2	160,5	159,8	159,2
Максимальное усилие прессования (P_{max}), МН	20,9	21,1	21,4	21,7	21,9

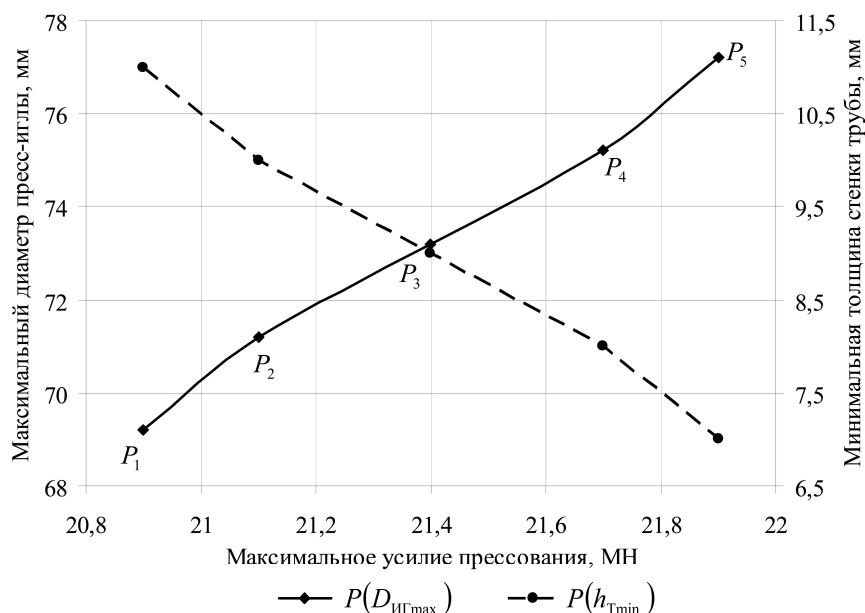


Рис. 2. Зависимость максимального усилия прессования трубы переменного сечения от максимального диаметра пресс-иглы и минимальной толщины стенки: $P_1 = 20,9$ МН, $P_2 = 21,1$ МН, $P_3 = 21,4$ МН, $P_4 = 21,7$ МН, $P_5 = 21,9$ МН

На рис. 2 представлены построенные в одной системе координат с использованием заданных значений определяющих параметров и расчетных значений параметров отклика графические зависимости изменения значения максимального усилия прессования от максимального диаметра пресс-иглы и минимальной толщины стенки трубы.

В соответствии с графическими зависимостями, представленными на рис. 2, приведено подтверждение фундаментального положения теории прессования [2]. Показано, что значение величины максимального усилия прессования $P_5 = 21,9$ МН, возникающего при прессовании трубы с меньшей толщиной стенки (7 мм) на заднем участке, превышает значения величины максимального усилия прессования $P_1 = 20,9$ МН, возникающего при прессовании трубы с большей толщиной стенки (11 мм). При этом зависимости изменения параметров отклика от определяющих параметров обратно пропорциональны.

Таким образом, в отличие от опубликованных в работах [3–5] в настоящее время зависимостей для определения максимального значения усилия

прессования разработанная математическая модель позволяет, учитывая специфическую профилировку прессового инструмента, прогнозировать возможность изготовления труб заданного сортамента и определять рациональную форму прессового инструмента.

Литература

1. Тарновский, И.Я. *Формоизменение при пластической обработке металлов* / И.Я. Тарновский. – М.: Металлургиздат, 1954. – 445 с.
2. Истомин, П.С. *Прессование металлов* / П.С. Истомин. – 3-е изд. – М.: Металлургиздат, 1944. – 344 с.
3. Pearson, C.E. *The extrusion of metals* / C.E. Pearson. – London.: Metal Industry, 1960. – 226 с.
4. Позднеев, А.А. *Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения* / А.А. Позднеев, П.В. Трусков, Ю.И. Няшин. – М.: Наука, 1986. – 341 с.
5. Хилл, Р. *Математическая теория пластичности* / Р. Хилл; пер. с англ. Л.Э. Эльсгольца. – М.: Гостехтеоретиздат, 1956. – 407 с.

Поступила в редакцию 14 февраля 2012 г.