

УДК 621.983.4

Дубина В. И.
Широкобоков В. В.
Бичевой А. Ф.
Засовенко А. В.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ УСИЛИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ХОЛОДНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ

При разработке технологического процесса холодного выдавливания важно знать не только аналитическое выражение, позволяющее достаточно точно определить усилия деформирования – P_{∂} , но и форму графика усилия деформации позволяющие провести энергетические и прочностные расчеты кривошипных прессов. Форма графика усилия деформации для обратного выдавливания крупногабаритных деталей на кривошипных прессах на сегодняшний день не раскрыта со всей достоверностью. Поэтому авторам пришлось провести исследования по силовому режиму и тепловому эффекту процесса обратного выдавливания деталей, которые позволили выяснить особенности термомеханического режима данного процесса, форму нагрузочного графика с большими степенями деформации ($\varepsilon = 90 - 99 \%$). Процесс пластической деформации сопровождается упрочнением и разупрочнением металла. Изменение напряжения текучести σ_s в зависимости от величины и скорости деформации, температуры деформируемого тела носит сложный характер. Зная зависимость истинного сопротивления от степени, температуры и скорости деформации при обратном выдавливании крупногабаритных деталей, можно легко рассчитать усилия деформирования по формуле:

$$P_{\partial} = n_{\phi} \sigma_{\partial} F_n, \quad (1)$$

где n_{ϕ} – относительное удельное усилие деформации, зависящее от размеров деформируемой заготовки, степени деформации и условий контактного трения, значение n_{ϕ} приведены в работе [1];

σ_{∂} – истинное сопротивление, зависящее от величины деформации, скорости деформирования и температуры. Значение σ_{∂} приведены в работе [2];

F_n – площадь пуансона;

Целью данной работы является определение истинного сопротивления срезу σ_{∂} и относительного удельного усилия деформации n_{ϕ} в характерных точках A, B, C, D, E , необходимых для построения графика усилия деформации.

Методику построения графика усилия деформации при холодном обратном выдавливании, рассмотрим, на примере, процесса обратного выдавливания полого стакана $\varnothing 85$ мм, с толщиной стенки 0,5 мм. Отношение диаметра матрицы к диаметру пуансона составляет $X = 85/84 = 1,0118$, что соответствует степени деформации 98 %, коэффициент трения $\mu = 0,1$, материал – алюминий А5 (А0), высота детали $\dot{I} = 220$ мм, высота заготовки $H_3 = 7$ мм.

Для построения графика усилий деформации необходимо знать истинное сопротивление σ_{∂} и относительное удельное усилие деформации (n_{ϕ}) в характерных точках A, B, C, D, E , по которым строится график, представленный на рис. 1.

Точка A характеризует начало процесса деформации, истинное сопротивление в точке A будет равно пределу текучести данного материала:

$$\sigma_{\partial A} = \sigma_S = 4,4 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 44 \text{ МПа.}$$

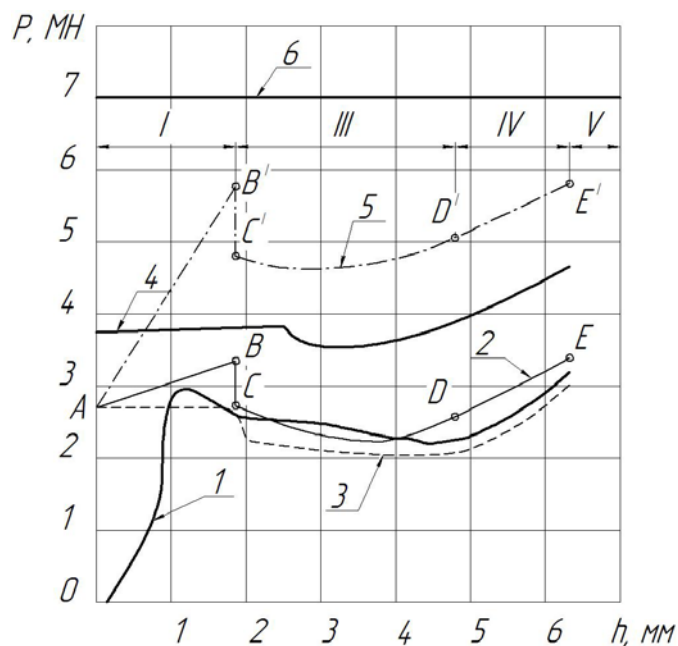


Рис. 1. Кривые изменения усилия деформации по ходу пуансона при обратном выдавливании низкой заготовки (материал алюминий А5; $H_3 = 7$ мм; $x = 1,0118$; $\varepsilon = 98\%$; $d = 85$ мм; $S = 0,5$ мм):

1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая авторов с учетом теплового эффекта; 3 – теоретическая кривая авторов при $\sigma_s = \sigma_{s0} = \text{const}$; 4 – теоретическая кривая по Евстратову [6]; 5 – теоретическая кривая авторов без учета теплового эффекта; 6 – теоретическая кривая по Фаворскому [7]; I – участок выдавливания $h_1 = H_3 - h_x = 7 - 5,2 = 1,8$ мм; III – начало нестационарной стадии $h_3 = h_x/2 = 5,2/2 = 2,6$ мм; IV – конец нестационарной стадии $h_4 = h_3 - h_5 = 2,6 - 0,75 = 1,85$ мм; V – толщина дна $h_5 = 1,5S = 0,75$ мм

Точка В на кривой усилия деформации соответствует началу не стационарной стадии выдавливания, в нашем случае:

$$h_1 = H_3 - h_x = 7 - 5,2 = 1,8 \text{ мм},$$

где h_x – глубина очага деформации;

$$h_x = \frac{d}{\sqrt{3}} \sqrt{x-1} = \frac{84}{\sqrt{3}} \sqrt{1,0118-1} = 5,2 \text{ мм}.$$

Заготовка на этом участке осаживается и начинает течь в щель между пуансоном и матрицей. Усредненная пластическая деформация ε_m в точке В приблизительно может быть определена по формуле:

$$\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_{A1}}{x^2} + \left(\frac{x^2 - 1}{x^2} \right) \varepsilon_{B2} + \frac{x^2 - 1}{x^4} \varepsilon_{A2}, \quad (2)$$

где $x = 1,0118$;

$\varepsilon_{A1}, \varepsilon_{A2}, \varepsilon_{B2}$ – усредненное значение пластической деформации в каждой зоне [2], а также по номограмме рис. 2 [2], $\varepsilon_m = 2,25$.

Скорость деформации:

$$\varepsilon = \frac{V_d}{h_x} = \frac{85}{5,2} = 16 \text{ с}^{-1},$$

где $V_d = (0,085 - 0,5) \text{ м/с}$ – скорость перемещения ползуна (пуансона) на кривошипных прессах.

Определяем среднее напряжение текучести σ_m по кривым упрочнения приведенных в [4] или по формуле $\sigma_m = C(B + \varepsilon)^n$. Для алюминия А5 (А0), согласно проведенным экспериментам на одноосное растяжения, имеем:

$$\psi_{ш} = 0,2; n = \frac{\psi_{ш}}{1 - \psi_{ш}}; C = \frac{\sigma_B}{1 - \psi_{ш}} \psi_{ш}^{-n} = \frac{7,8}{1 - 0,2} \cdot 0,2^{-0,25} = 14,5,$$

где $B = 0,12$ согласно [5].

$$\text{При } \varepsilon_i = \varepsilon_{тВ} = 2,25, \sigma_{mB} = 14,5(0,12 + 2,25)^{0,25} = 17,9 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 179 \text{ МПа}.$$

Возрастание температуры деформируемого металла в точки B за счет теплового эффекта деформации согласно [2] составит:

$$\Delta_{тВ} = \frac{\sigma_{mB} \cdot \varepsilon_{mB}}{j \cdot \rho \cdot c} = \frac{17,9 \cdot 2,25}{0,21 \cdot 2,7} \cdot \frac{1000}{427} = 166 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Средняя температура заготовки в точке B будет:

$$t_B = t_0 + \Delta_{тВ} = 20 + 166 = 186 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Из графика на рис. 2, представляющего изменение механических свойств алюминия марки А5 (А0) в зависимости от температуры, находим температурный коэффициент α :

$$\alpha = \frac{\lg \sigma_{S1} - \lg \sigma_{S2}}{\Delta t \cdot \lg \varepsilon} = \frac{\lg 38 - \lg 30}{50 \cdot \lg 2,71} = 0,0035.$$

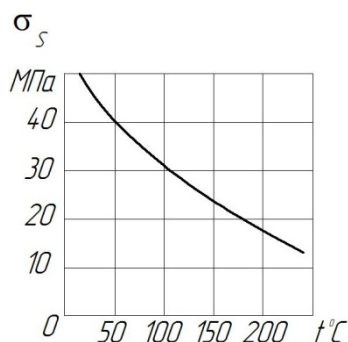


Рис. 2. График механических свойств в зависимости от температуры для алюминия марки А5

Коэффициент B' , учитывающий влияние скорости деформации, можно принять равным $B' = 1,1$ [5].

Постоянная D , согласно экспериментам, для алюминия равна $D = 0,12$. Постоянную C_1 определим по формуле:

$$C_1 = \frac{\sigma_{S0}}{B^n} = \frac{4,4}{0,12^{0,25}} = 7,5.$$

Истинное сопротивление деформации в точке B с учетом теплового эффекта определим по формуле:

$$\sigma_{\partial B} = C_1(B + \varepsilon_i)^n \cdot e^{-\alpha \Delta t} + D \ln(1 + B' \varepsilon_i'). \quad (3)$$

Тогда:

$$\sigma_{\partial B} = 7,5(0,12 + 2,25)^{0,25} e^{-0,0035 \cdot 166} + 0,12 \ln(1 + 1,1 \cdot 16) = 5,55 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 55,5 \text{ МПа}.$$

Истинное сопротивление деформации в точке *B* без учета теплового эффекта будет равно:

$$\sigma_{\partial B} = 7,5(0,12 + 2,25)^{0,25} + 0,12 \ln(1 + 1,1 \cdot 16) = 9,65 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 96,5 \text{ МПа}.$$

Точка *C* характеризует начало нестационарной стадии процесса.

Истинное сопротивление деформации в точке *B* будет равно истинному сопротивлению в точке *B* $\sigma_{\partial C} = \sigma_{\partial B}$. Спад усилий в этой точке объясняется изменением условий трения, которые учитываются формулой (14) [1] или графиком рис. 3, представляющим изменение относительного удельного усилия деформации $n_{\phi} \left(\frac{\rho}{\sigma_S} \right)$ в зависимости от $x = \frac{D}{d}$.

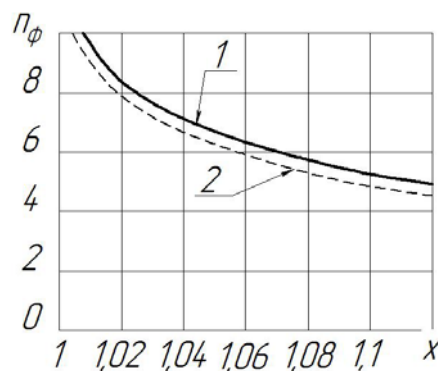


Рис. 3. График для определения относительного удельного усилия деформации n_{ϕ} :
1 – стационарная стадия; 2 – нестационарная стадия

Точка *D* характеризует интенсивное начало увеличения усилия деформации, обуславливающееся резким повышением скольжения металла по поверхности матрицы и пуансона.

В точке *D* температура деформируемого металла достигает своего максимального значения. Истинное сопротивление деформации $\sigma_{\partial D}$ определим по формуле (15) [3].

Среднее напряжение текучести по формуле составит:

$$\sigma_{mD} = 14,5(0,12 + 2,25)^{0,25} + 17,9 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 179 \text{ МПа}.$$

Возрастания температуры металла в точке *D* за счет теплового эффекта деформации согласно формулы составит:

$$\Delta t_D = \frac{\sigma_{mD} \cdot \varepsilon_{mD}}{j \cdot \rho \cdot c} = \frac{17,9 \cdot 2,25}{0,21 \cdot 2,7} \cdot \frac{1000}{427} = 166 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Средняя температура в точке *D* будет:

$$t_D = t_0 + \Delta t_D = 20 + 166 = 186 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Используя численные значения коэффициентов и постоянных C_1, α, B', D полученные ранее, определим истинное сопротивление деформации в точке D согласно [3] с учетом теплового эффекта:

$$\sigma_{\partial D} = 7,5(0,12 + 2,25)^{0,25} e^{-0,0035 \cdot 166} + 0,12 \ln(1 + 1,1 \cdot 16) = 5,55 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 55,5 \text{ МПа.}$$

Истинное сопротивление деформации в точке D без учета теплового эффекта будет равно:

$$\sigma_{\partial D} = 7,5(0,12 + 2,25)^{0,25} + 0,12 \ln(1 + 1,1 \cdot 16) = 9,65 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 96,5 \text{ МПа.}$$

Точка E относится к окончанию процесса. На этом участке усилие начинает быстро расти из-за нарастания сил трения между металлом и дном матрицы и изменением характера течения металла, и может по величине достигать двух кратной величины усилия в точке B .

В связи с этим получение деталей с толщиной доньшка $h_q < (1,0 - 1,5)S$ не следует рекомендовать. Усилие выдавливания в точке E соответствует усилию в точке B .

Для определения усилия деформации в характеристических точках A, B, C, D, E необходимо определить величину относительного удельного усилия деформации n_ϕ [1]. Для точек A и B – $n_\phi = 10,6$ при $x = 1,0118$; для точек C и D – $n_\phi = 8,6$ согласно рис. 3 [1].

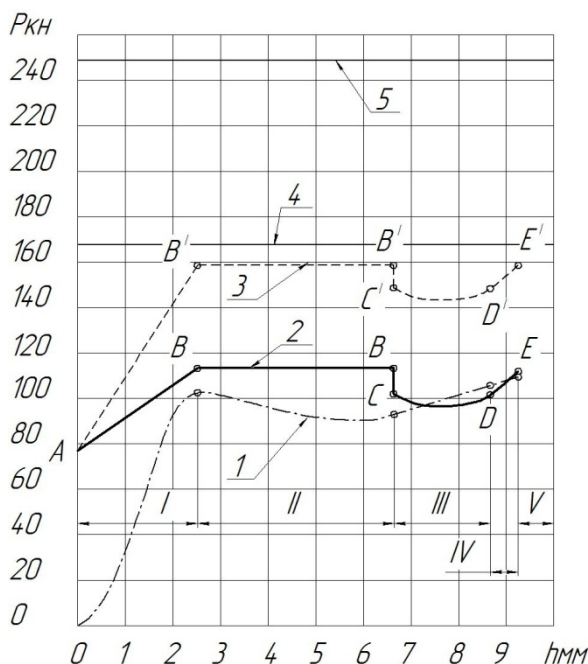


Рис. 4. Кривые изменения усилия деформации по ходу пуансона при обратном выдавливании высокой заготовки (материал алюминий А5; $H_3 = 10$ мм; $x = 1,05$; $\varepsilon = 0,897$; $d = 19$ мм; $S = 0,5$ мм):

1 – экспериментальная кривая; 2 – теоретическая кривая авторов с учетом теплового эффекта; 3 – теоретическая кривая авторов без учета теплового эффекта; 4 – теоретическая кривая по Евстратову [6]; 5 – теоретическая кривая по Фаворскому [7]; I – участок выдавливания $h_1 = h_x = 2,4$ мм; II – стационарная стадия $h_2 = 10 - h_x - h_g = 6,85$ мм; III – начало нестационарной стадии $h_3 = h_x - h_4 = 1,95$ мм; IV – конец нестационарной стадии $h_4 = h_x/2 - h_g = 0,45$ мм; V – толщина дна $h_5 = 1,5S = 0,75$ мм

Зная величины n_ϕ и σ_∂ , для каждой точки, найдем усилие деформации в каждой точке с учетом теплового эффекта:

$$P_A = n_\phi \cdot \sigma_{\partial A} \cdot F_H = 10,6 \cdot 4,4 \cdot 5674 = 2,74 \text{ МН};$$

$$P_B = 10,6 \cdot 5,55 \cdot 5674 = 3,38 \text{ МН};$$

$$P_C = 8,6 \cdot 5,55 \cdot 5674 = 2,70 \text{ МН};$$

$$P_D = 8,6 \cdot 5,55 \cdot 5674 = 2,70 \text{ МН};$$

$$P_E = P_B = 3,38 \text{ МН}.$$

Без учета теплового эффекта, усилие в точках:

$$P_A = 2,74 \text{ МН}; \quad P_B = 5,8 \text{ МН}; \quad P_C = 4,7 \text{ МН}; \quad P_D = 4,7 \text{ МН}; \quad P_E = P_B = 5,8 \text{ МН}.$$

Графики усилия деформации показаны на рис. 1 и 4, на которых представлены полученные расчетные усилия авторов в сравнении с экспериментальной кривой и кривыми других исследователей.

ВЫВОДЫ

Разработана новая методика построения графиков усилия деформации при холодном выдавливании с учетом теплового эффекта деформации, которые построенные на рис. 1, 4. Как видно из графиков деформации, расхождение величин усилий деформации по экспериментальной кривой 1 и теоретической кривой 2 авторов не превышает 7–10 % на стационарной стадии выдавливания. На рис. 1 и 4 представлены кривые других исследователей, точность которых на 50–200 % выше теоретических и экспериментальных кривых авторов, так как они не учитывали влияние теплового эффекта деформации.

Форма построения графика усилия деформации для обратного выдавливания крупногабаритных пустотелых деталей со степенью деформации 98 % на кривошипных прессах представлена впервые. Полученная форма графиков позволит провести энергетические и прочностные расчеты прессов с большей достоверностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубина В. И. *Об очаге деформации при холодном обратном выдавливании* / В. И. Дубина, А. В. Явтушенко // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2005. – № 2. – С. 62–67.
2. Дубина В. И. *Определение температуры деформации при обратном выдавливании* / В. И. Дубина, А. В. Явтушенко // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2006. – № 1. – С. 59–62.
3. Дубина В. И. *Влияние температуры, величины и скорости деформации на истинное сопротивление при холодном выдавливании* / В. И. Дубина, В. В. Широкобоков // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки* : зб. наук. пр. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2008. – № 6. – С. 44–47.
4. Johnson W. Nellor P. *Plasticity for Mechanical Engineers Von Nostrand, London, 1962.* – 430 с.
5. Евстратов В. А. *Исследования процесса холодной закрытой прошивки* : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 050305. – Харьков : ХПИ, 1965. – 22 с.
6. Дубина В. И. *Тепловий ефект при зворотньому видавлюванні порожнистих виробів* / В. И. Дубина, В. В. Широкобоков // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – № 2. – С. 40–42.

Дубина В. И. – канд. техн. наук, проф. ЗНТУ;

Широкобоков В. В. – канд. техн. наук, доц. ЗНТУ;

Бичевой А. Ф. – канд. техн. наук, доц. ЗНТУ;

Засовенко А. В. – канд. техн. наук, ст. преп. ЗНТУ.

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: shirokobokov_vit@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.10.2012 г.