

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.73.043

А.В. СТЕПАНЕНКО, акад. АН БССР,  
Н.И. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук (ФТИ)

## СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ШТАМПОВКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В РАЗЪЕМНЫХ МАТРИЦАХ

Существующие аналитические решения, позволяющие определять удельное усилие закрытой штамповки цилиндрических шестерен с оформлением зубьев, сложны для практического применения, в них не учитывается давление в момент завершения заполнения металлом элементов гравюры штампа.

Для определения удельных усилий деформирования и контактных напряжений использован метод совместного решения приближенных уравнений равновесия и пластичности, позволяющий получить решение в замкнутом виде и представить его в виде расчетных формул. Формообразование зуба рассматривали как процесс выдавливания металла в сужающийся канал матрицы. Задачу сводили к плоской и рассматривали профиль зуба в торцовом сечении (рис. 1).

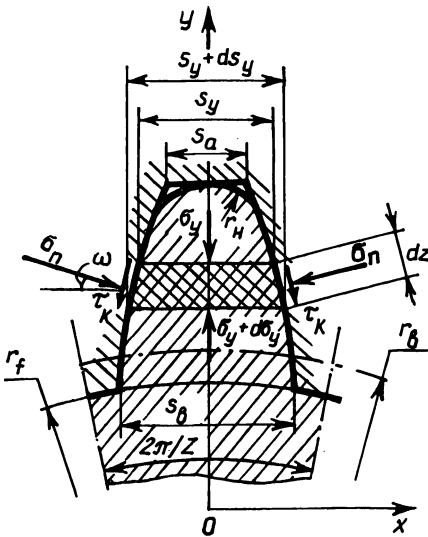


Рис. 1. Схема к расчету напряжений

Полное давление  $\sigma_{уп}$ , необходимое для деформирования при течении металла во впадину матрицы, определяется сопротивлением течению в отдельных элементах гравюры:

$$\sigma_{уп} = \sigma_{vbx} + \sigma_y, \quad (1)$$

где  $\sigma_{vbx}$  — давление, обусловленное сопротивлением течению металла на входе во впадину матрицы;  $\sigma_y$  — давление, вызванное сопротивлением течению металла в сужающуюся впадину матрицы.

Давление, обусловленное сопротивлением течению металла на входе во впадину матрицы, определяем согласно [ 1 ], подставив параметры профиля зуба матрицы:

$$\sigma_{y_{вх}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s [0,5 + 2,75 \lg \frac{2\pi r_f}{z s_b} + \frac{s_b + H}{H s_b} (r_b - r_f)], \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение текучести деформируемого материала при данной температуре и скорости деформации;  $r_f$ ,  $r_b$  – радиусы соответственно выступов и основной окружности матрицы;  $z$  – число зубьев;  $s_b$  – ширина впадины по основной окружности;  $H$  – высота матрицы.

Давление  $\sigma_y$  определяли совместным решением дифференциального уравнения равновесия выделенного элемента и уравнения пластичности при условии постоянства сил внешнего трения  $\tau_k$  [2]:

$$\tau_k = \mu \sigma_s \leq 0,5 \sigma_s, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент внешнего трения.

Уравнение равновесия элемента, ограниченного двумя плоскостями, параллельными оси  $X$ , и эвольвентным профилем зуба, имеет вид

$$(\sigma_y + d\sigma_y)(s_y + ds_y) - \sigma_y s_y - 2\sigma_n \sin \omega dz - 2\tau_k \cos \omega dz = 0, \quad (4)$$

где  $s_y$  – ширина впадины матрицы в плоскости меньшего сечения;  $\sigma_n$  – нормальное напряжение на контактной поверхности;  $dz$  – длина дуги выделенного элемента;  $\omega$  – угол наклона хорды, стягивающей элементарную дугу, относительно оси  $Y$ .

Длину дуги выделенного элемента заменяем хордой, тогда

$$dz \approx \frac{ds_y}{2\sin \omega}. \quad (5)$$

Условие пластичности для  $\frac{\pi}{4} K \leq \tau_k \leq K$  принимали в виде [3.]

$$\sigma_x - \sigma_y = 0, \quad (6)$$

где  $K$  – предел текучести на сдвиг;  $\sigma_x$  – напряжение на контактной поверхности в направлении оси  $X$ ,  $\sigma_x = \sigma_n \cos \omega$ .

Подставляя значения величин из формул (3), (5), (6) в уравнение (4) и пренебрегая малыми величинами второго порядка, получим

$$d\sigma_y = [\mu \sigma_s \operatorname{ctg} \omega - (1 - \frac{1}{\cos \omega}) \sigma_y] \frac{ds_y}{s_y}. \quad (7)$$

При расчете нестационарной стадии использовали приближенный метод, разбивая процесс формообразования на ряд последовательных этапов, на каждом из которых течение металла принимали стационарным.

Интегрируя уравнение (7) при условии  $\omega = \text{const}$ , получим

$$\sigma_y = \frac{B}{A} [1 - (\frac{s_a}{s_y})^A] + \sigma_{ya} (\frac{s_a}{s_y})^A, \quad (8)$$

где  $A = 1 - \frac{1}{\cos \omega}$ ,  $B = \mu \sigma_s \operatorname{ctg} \omega$ ;  $s_a$  – ширина впадины матрицы по наибольшему диаметру гравюры.

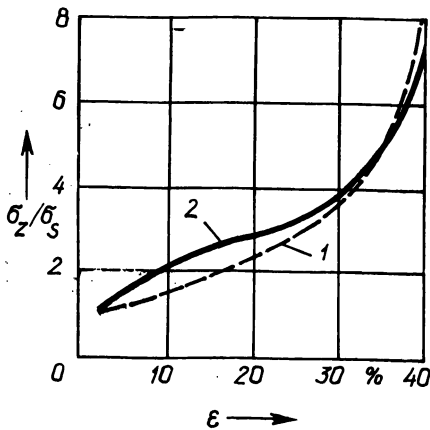


Рис. 2. Зависимость удельного усилия на пуансоне при штамповке от степени деформации:

1 – расчетная по формуле (11); 2 – экспериментальная

В момент заполнения металлом впадины необходимо приложить дополнительное давление  $\sigma_{ya}$  для заполнения углов впадины [4]:

$$\sigma_{ya} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left( \frac{1+\mu}{\mu} \right) (\lambda^{-\mu} - 1), \quad (9)$$

где  $\lambda$  – степень заполнения впадин:  $\lambda = 2r_n/s_a$ ;  $r_n$  – радиус незаполнения гравюры матрицы.

Подставляя значения величин из формулы (9) в (8), получим

$$\sigma_y = \frac{B}{A} \left[ 1 - \left( \frac{s_a}{s_y} \right)^A \right] + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left( \frac{1+\mu}{\mu} \right) \left[ \left( \frac{s_a}{2r_n} \right)^\mu - 1 \right]. \quad (10)$$

Нормальные напряжения на контактной поверхности

$$\sigma_n = \sigma_s \left\{ \frac{\mu \operatorname{ctg} \omega}{\cos \omega - 1} \left[ 1 - \left( \frac{s_a}{s_y} \right)^A \right] + \frac{2}{\sqrt{3} \cos \omega} \left( \frac{1+\mu}{\mu} \right) \left[ \left( \frac{s_a}{2r_n} \right)^\mu - 1 \right] \right\}.$$

Полное давление при оформлении зубьев с учетом уравнений (1), (2) и (10) может быть выражено

$$\sigma_{yn} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left\{ 0,5 + 2,75 \lg \frac{2\pi r_f}{z s_b} + \frac{s_b + H}{H s_b} (r_b - r_f) + \frac{\sqrt{3} \mu \cos^2 \omega}{2 \sin \omega (\cos \omega - 1)} \left[ 1 - \left( \frac{s_a}{s_y} \right)^A \right] + \left( \frac{1+\mu}{\mu} \right) \left[ \left( \frac{s_a}{2r_n} \right)^\mu - 1 \right] \right\}.$$

Удельное усилие на пуансоне при штамповке зубчатых колес в разъемных матрицах определено исходя из условия пластичности для осадки цилиндрических заготовок  $\sigma_z = \sigma_{yn} + \sigma_s$  [5]:

$$\sigma_z = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \left\{ 1,36 + 2,75 \lg \frac{2\pi r_f}{z s_b} + \frac{s_b + H}{H s_b} (r_b - r_f) + \frac{\sqrt{3} \mu \cos^2 \omega}{2 \sin \omega (\cos \omega - 1)} \left[ 1 - \left( \frac{s_a}{s_y} \right)^A \right] + \left( \frac{1 + \mu}{\mu} \right) \left[ \left( \frac{s_a}{2r_H} \right)^\mu - 1 \right] \right\}. \quad (11)$$

На рис. 2 представлена зависимость  $\sigma_z / \sigma_s$  при штамповке зубчатых колес от степени деформации  $\epsilon$ . Расхождение экспериментальной 2 и теоретической 1 зависимостей не превышает 15 %.

Таким образом, полученные расчетные зависимости хорошо совпадают с экспериментальными данными и могут быть применены для определения силовых параметров при горячей штамповке зубчатых колес в разъемных матрицах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ш о ф м а н Л.А. Основы расчета процессов штамповки и прессования. — М., 1961.
2. Теоретические основыковки и горячей объемной штамповки / Е.М. Макушок и др. — Мн., 1968.
3. Теория пластических деформаций металлов / Е.П. Унков и др. — М., 1983.
4. Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши и Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов. — М., 1968.
5. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию: Инженерные расчеты процессов конечного формирования материалов. — Л., 1978.

УДК 621.983:681.2:531.787-272

И.Г. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук (БПИ),  
В.И. ЗАДОРЖНЫЙ, В.С. ШЛЯХОВОЙ, канд. техн. наук  
(НИИТеплоприбор, Смоленск)

#### ПОЛУЧЕНИЕ ЗАДАННОГО ПРОФИЛЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ МАНОМЕТРИЧЕСКОЙ ПРУЖИНЫ ПРИ ЕЕ ИЗГОТОВЛЕНИИ

Профилирование — операция изготовления манометрической пружины из предварительно изогнутой круглой трубчатой заготовки путем плющения ее в поперечном сечении в плоскости изгиба, сопровождающегося самопроизвольным уменьшением радиуса кривизны заготовки до заданного. При этом поперечному сечению манометрической пружины придается необходимый профиль [1].

Профилирование осуществляется путем прокатки трубчатой заготовки между двумя параллельными валками разного диаметра. При этом технологически оправдано сочетание наружного валка в виде чашки с внутренней рабочей поверхностью и внутреннего (ролика) с наружной рабочей поверхностью. Диаметр наружного валка  $D_n$  определяется диаметром предварительной гибки трубчатой заготовки, а диаметр внутреннего  $D_{вн}$  — окончательным диамет-