УДК 621.777

Д.Мерзуг, Я.Е.Бейгельзимер, В.З.Спусканюк

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ШТАМПОВКИ ЗАГОТОВОК ВСТАВОК МАТРИЦ В СРЕДЕ ЖИДКОСТИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Донецкий физико-технический институт НАН Украины, 340114, г. Донецк, ул. Р.Люксембург, 72

Статья поступила 29 мая 1995 года

Предложена математическая модель процесса выдавливания профильного отверстия вставки матрицы, реализуемого в среде жидкости высокого давления. Получены соотношения для расчета усилия выдавливания полости, предельной деформации без разрушения заготовки при заданном давлении гидроподдержки, геометрических параметров заготовки.

Прогрессивным направлением в развитии технологии холодной штамповки точных заготовок является разработка методов деформирования с использованием жидких либо квазижидких сред [1-3]. В результате применения жидкостей существенным образом улучшаются условия смазки в очаге пластической деформации, проще обеспечивается повышенный уровень гидростатического давления в обрабатываемом материале и соответственно более высокая технологическая пластичность заготовок, повышается уровень прочности и стойкости формообразующих инструментов. Эти возможности особенно важны при изготовлении изделий из высокопрочных и малопластичных материалов.

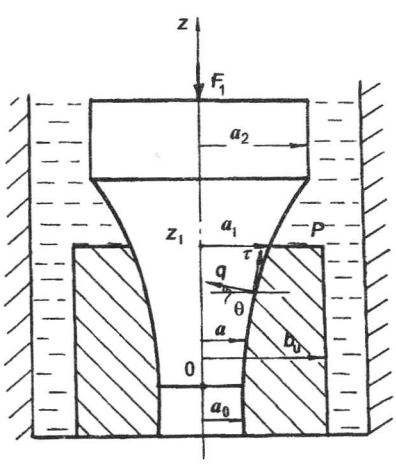

Рис. 1. Схема процесса гидроштамповки заготовок

Известные работы, посвященные исследованию методов гидроштамповки, описывают различные схемы и способы деформирования, их технологические возможности и преимущества. Существенно меньше публикаций, дающих аналитические оценки технологических параметров процессов.

В настоящей работе предлагается математическая модель процесса формообразования профильного отверстия вставки матрицы методом

вдавливания мастер-пуансона в отверстие предварительно подготовленной полой заготовки (рис. 1). Обработка производится в гидростате при давлении P жидкости, окружающей заготовку и инструмент, до 1 ГПа. Эксперименты показали, что данный способ может эффективно использоваться для формообразования профильных вставок матриц из инструментальных сталей.

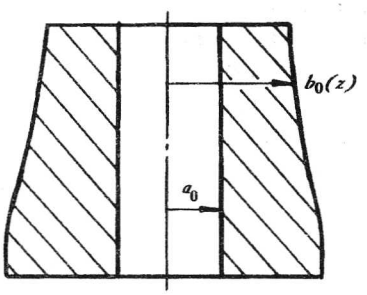

Рис. 2. Схема исходной заготовки

Целью теоретического анализа процесса является получение соотношений для определения усилия деформирования, предельных деформаций заготовки без разрушения, профиля наружной поверхности исходной заготовки радиусом $b_0(z)$, обеспечивающего получение изделия с наружной цилиндрической поверхностью радиусом b_u (см. рис. 1 и 2).

Для записи уравнения равновесия пуансона определим силу F_2, действующую на него со стороны заготовки и рабочей жидкости.

Составляющая силы F_{2q}, обусловленная контактным давлением заготовки на оправку,

$$dF_{2q} = 2\pi a(z)q(z)\frac{dz}{\cos\theta(z)}\sin\theta(z),$$

$$F_{2q} = 2\pi\int_0^{z_1} a(z)q(z)\operatorname{tg}\theta(z)dz.$$

Но $\operatorname{tg}\theta(z) = \frac{da}{dz}$, следовательно,

$$F_{2q} = 2\pi\int_{a_0}^{a_1} q(z)a(z)da \qquad (1)$$

Величину $q(z)$ оценим из условия, что элемент трубной заготовки перешел в пластическое состояние [4]:

$$q(z) = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т = ln\frac{b(z)}{a(z)} + P, \qquad (2)$$

где $\sigma_т$ — предел текучести металла заготовки, P — давление жидкости.

Предполагая, что длина заготовки не изменяется, получаем из условия сохранения объема

$$b^2 - a^2 = b_0^2(z) - a_0^2, \qquad (3)$$

где a_0 и $b_0(z)$ — начальный радиус соответственно внутреннего канала и наружной поверхности заготовки (в общем случае полагаем, что b_0 — функция от z).

Из соотношения (3) следует, что для получения цилиндрической внешней поверхности заготовки после внедрения пуансона необходимо, чтобы начальный профиль этой поверхности определялся соотношением

$$b_0(z) = \sqrt{b_u^2 + a_0^2 + a^2(z)}, \tag{4}$$

где b_u — радиус внешней поверхности изделия.

Полагая в последующем, что $b = b_u$, получаем из (2)

$$q(z) = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т = \ln\frac{b_u}{a(z)} + P. \tag{5}$$

Подставляя (5) в (1), находим

$$F_{2q} = 2\pi\int_{a_0}^{a_1}\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т \ln\frac{b_u}{a(z)}a(z)\mathrm{d}a + 2\pi\int_{a_0}^{a_1}Pa(z)\mathrm{d}a.$$

Перейдем к безразмерным радиусам, отнеся их к величине a_0 :

$$\bar{a} = \frac{a}{a_0}, \qquad \bar{b} = \frac{b}{a_0},$$

$$F_{2q} = 2\pi a_0^2\int_1^{\bar{a}_1}\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т \ln\bar{b}_u\,\bar{a}\,\mathrm{d}\bar{a} - 2\pi a_0^2\int_1^{\bar{a}_1}\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т\bar{a}\ln\bar{a}\,\mathrm{d}\bar{a} + 2\pi a_0^2\int_1^{\bar{a}_1}P\bar{a}\,\mathrm{d}\bar{a} =$$

$$= \pi a_0^2\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т\ln\bar{b}_u + P\right)\left(\bar{a}_1^2 - 1\right) - \frac{4}{\sqrt{3}}\pi a_0^2\sigma_т\int_1^{\bar{a}_1}\bar{a}\ln.\bar{a}\,\mathrm{d}\bar{a}.$$

Вычислим последний интеграл. Возьмем его по частям:

$$I = \int_1^{\bar{a}_1}\bar{a}\,\ln\bar{a}\,\mathrm{d}\bar{a} = \frac{1}{2}\bar{a}^2\ln\bar{a}\Big|_1^{\bar{a}_1} - \frac{1}{2}\int_1^{\bar{a}_1}\bar{a}^2\frac{1}{\bar{a}}\mathrm{d}\bar{a} = \frac{1}{2}\bar{a}_1^2\ln\bar{a}_1 - \frac{1}{4}\left(\bar{a}_1^2 - 1\right).$$

Подставляя это выражение в формулу для F_{2q} , получаем

$$F_{2q} = \pi a_0^2\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т\ln\bar{b}_u + P\right)\left(\bar{a}_1^2 - 1\right) - \frac{2}{\sqrt{3}}\pi a_0^2\sigma_т\left(\bar{a}_1^2\ln\bar{a}_1 - \frac{1}{2}\left(\bar{a}_1^2 - 1\right)\right). \tag{6}$$

Составляющая силы $F_{2\tau}$ обусловлена силами трения между пуансоном и заготовкой. Полагаем, что напряжение трения определяется по формуле

$$\tau = \mu q.$$

Тогда для $dF_{2\tau}$ получаем

$$dF_{2\tau} = 2\pi a(z)\mu q(z)dz,$$

$$F_{2\tau} = 2\pi\mu\int_0^{z_1} a(z)q(z)dz = 2\pi\mu\int_0^{z_1} a(z)\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_\tau \ln\frac{b_u}{a(z)} + P\right)dz.$$

Сила F_{2P}, действующая на пуансон со стороны рабочей жидкости (участок $z_1 z_2$),

$$F_{2P} = 2\pi\int_{a_1}^{a_2} Pa(z)da = \pi P\left(a_2^2 - a_1^2\right).$$

Уравнение равновесия пуансона имеет вид

$$F_1 = F_{2q} + F_{2\tau} + F_{2P}.$$

Подставляя сюда полученные выше соотношения для F_{2q}, $F_{2\tau}$ и F_{2P}, получаем

$$F_1 = \pi\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_\tau \ln\frac{b_u}{a_0} + P\right)\left(a_1^2 - a_0^2\right) - \frac{2}{\sqrt{3}}\pi\sigma_\tau a_1^2 \ln\frac{a_1}{a_0} + \frac{1}{\sqrt{3}}\pi\sigma_\tau\left(a_1^2 - a_0^2\right) +$$

$$+2\pi\mu\int_0^{z_1} a(z)\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_\tau \ln\frac{b_u}{a(z)} + P\right)dz + \pi P\left(a_2^2 - a_1^2\right).$$

Это уравнение позволяет при данной величине a_1 (или z_1) найти необходимое усилие F_1.

Определим исчерпание ресурса пластичности металла заготовки. С этой целью исследуем пути деформирования в координатах $\Lambda - \frac{\sigma}{T}$, где Λ — интенсивность деформаций сдвига, σ — гидростатическая компонента тензора напряжений, T — интенсивность касательных напряжений.

При плоской деформации трубы компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций имеют вид [4]:

$$\sigma_r = -\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_\tau \ln\frac{b}{r} - P,$$

$$\sigma_\varphi = \sigma_\tau - \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_\tau \ln\frac{b}{r} - P, \qquad (8)$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_\tau}{2} - \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_\tau \ln\frac{b}{r} - P,$$

$$\dot{\varepsilon}_r = \frac{du}{dr}, \qquad \dot{\varepsilon}_\varphi = \frac{u}{r}, \qquad \dot{\varepsilon}_z = 0, \qquad (9)$$

где u — величина радиальной скорости перемещения материальной точки трубы. Подставляя (9) в условие несжимаемости, получаем дифференциальное уравнение для u

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} = 0.$$

Интегрируя это уравнение, находим

$$u = \frac{c}{r}, \tag{10}$$

где c — постоянная.

Определим c по известной величине радиальной скорости перемещения точек внутренней поверхности трубы. Из рис.1 следует

$$u\big|_{r=a} = \frac{da}{dt} v, \tag{11}$$

где v — скорость движения пуансона.

Подставляя (10) в (11), получаем

$$c = a\frac{da}{dt} v.$$

Подставляя полученное выражение для u в соотношения (9), находим

$$\dot{\varepsilon}_r = -\frac{av}{r^2}\frac{da}{dt}, \qquad \dot{\varepsilon}_\varphi = \frac{av}{r^2}\frac{da}{dt}. \tag{12}$$

Используя соотношения (8), определяем выражение для гидростатической компоненты тензора напряжений

$$\sigma = \frac{1}{3}\left(\sigma_r + \sigma_\varphi + \sigma_z\right) = \frac{\sigma_т}{2} - \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_т \ln\frac{b}{r} - P. \tag{13}$$

Учитывая, что $T = \frac{\sigma_т}{\sqrt{3}}$, и используя соотношение (13), получаем выражение для коэффициента жесткости напряженного состояния

$$k = \frac{\sigma}{T} = \frac{\sqrt{3}}{2} - 2\ln\frac{b}{r} - P\frac{\sqrt{3}}{\sigma_т}. \tag{14}$$

Подставляя выражение (12) в формулу для $\dot{\gamma}_i$, находим

$$\dot{\gamma}_i = \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{\left(\dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_z\right)^2 + \left(\dot{\varepsilon}_r - \dot{\varepsilon}_\varphi\right)^2 + \left(\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\varphi\right)^2} = 2\left|\dot{\varepsilon}_r\right| = \frac{2av}{r^2}\cdot\frac{da}{dt}. \tag{15}$$

Из соотношения (14) следует, что наиболее жесткое напряженное состояние реализуется на внешней поверхности заготовки, при $r = b$.

В этом случае

$$k = \frac{\sqrt{3}}{2} - P\frac{\sqrt{3}}{\sigma_т}. \tag{16}$$

Сделанный вывод соответствует результатам экспериментов, которые свидетельствуют, что разрушение труб, нагруженных внутренним давлением, начинается снаружи.

Определим деформацию сдвига Λ, накопленную частицами металла, находящимися на поверхности заготовки

$$\Lambda = \int_0^t \dot{\gamma}_i \, \mathrm{d}t = 2\int_0^t \frac{a\,v}{b^2}\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}z}dt. \tag{17}$$

Учитывая, что $v\mathrm{d}t = \mathrm{d}z$, получаем из (17)

$$\Lambda = 2\int_{a_0}^{a} \frac{a}{b^2}\mathrm{d}a. \tag{18}$$

Согласно (3)

$$b^2 = a^2 + b_0^2 - a_0^2.$$

Подставляя это соотношение в (18), определяем

$$\Lambda = 2\int_{a_0}^{a} \frac{a\mathrm{d}a}{a^2 + b_0^2 - a_0^2} = \int_{a_0}^{a} \frac{\mathrm{d}\,a^2}{a^2 + b_0^2 - a_0^2} = \ln\frac{a^2 + b_0^2 - a_0^2}{b_0^2}.$$

Учтем, что согласно (4)

$$b_u^2 = a^2 + b_0^2 - a_0^2.$$

Подставляя последнее соотношение в предыдущее, получаем

$$\Lambda = \ln\frac{b_u^2}{b_u^2 + a_0^2 - a^2}. \tag{19}$$

Наибольшего значения величина Λ достигает на верхнем торце заготовки при $a = a_1$:

$$\Lambda = \ln\frac{b_u^2}{b_u^2 + a_0^2 - a^2}. \tag{20}$$

Согласно работе [5], при k=const металл до разрушения может испытать деформацию $\Lambda_P(k)$, где Λ_P — предельная пластичность металла. На основании этого, а также соотношений (16) и (20) имеем следующий критерий деформаций заготовки без разрушения

$$\ln\frac{b_u^2}{b_u^2+a_0^2-a_1^2} < \Lambda_P\left(\frac{\sqrt{3}}{2}-P\frac{\sqrt{3}}{\sigma_т}\right). \qquad (21)$$

Соотношения (4), (7) и (21) в совокупности позволяют рассчитать процесс, т.е. определить профиль наружной поверхности заготовки, выбрать давление, обеспечивающее деформацию без разрушения, и определить силу F_1, необходимую для получения профиля вставки матрицы.

Вывод. Разработана математическая модель процесса холодной штамповки вставок матриц с радиальным течением металла в среде жидкости высокого давления, позволяющая определять усилие деформирования, предельные деформации без разрушения при заданном давлении гидроподдержки и профиль исходной заготовки, при котором формообразуется изделие с цилиндрической наружной поверхностью.

1. *В.П.Алексеев, И.М.Коваленко, В.З.Спусканюк и др.*,Физика и техника высоких давлений вып. 20, 69 (1985).
2. *Х.Л.Пью.* Механические свойства материалов под высоким давлением. — М.: Мир, 1973. —Т.2. — 372 с.
3. *Э.В.Джангиров, Ф.К.Пай, В.Я.Колганов и др.* — В кн. : Сборник научных трудов Фрунз. политехн. ин-та. - Фрунзе, 1979. — С.23-29.
4. *Р.Хилл.* Математическая теория пластичности. - М.: Госуд. изд-во технико-теоретич. литературы, 1956. - 407 с.
5. *В.Л.Колмогоров.* Напряжения, деформации, разрушение. - М.: Металлургия, 1970. - 229с.

D.Merzug, Ya.E.Beigelzimer, V.Z.Spuskanyuk

ANALYSIS OF THE PROCESS OF DIE INSERT BILLET STAMPING IN THE MEDIUM OF HIGH-PRESSURE LIQUID

A mathematical model is proposed for the process of shape forming of the die insert profile hole by the method of pressing the master-punch into a hole of preliminarily prepared hollow billet. Relationships have been obtained to calculate the deformation force and ultimate strain of the billet in the absence of failure. A profile of the billet outer surface has been found which provides the obtaining of article with the outer cylindrical surface of a preset radius.

Fig.1. Schematic showing of the process billet hydraulic stamping

Fig.2. Scheme of the initial billet