

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ХОЛОДНОМ ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВМ «БЭСМ-4»

Г. Л. КАЛИНИЧЕНКО, Д. П. СНЕГИРЕВ

(Представлена научным семинаром кафедры инженерной и вычислительной математики)

Самые различные обстоятельства требуют от машиностроения создания надежных, производительных машин с наименьшими экономическими затратами. Холодное выдавливание металлов при рациональном применении позволяет значительно снизить трудоемкость изготовления и стоимость изделий.

В процессе холодного выдавливания в результате упрочнения металла, особенно поверхностных его слоев и наличия текстуры, повторяющей контуры изделий, наблюдается повышение износостойкости и усталостной прочности деталей. Предварительные исследования показали повышение прочности при знакопеременных нагрузках на 20—50% [1].

Для рационального построения технологических операций холодного выдавливания упрочняющихся металлов важно знать распределение напряжений, зависящих от многих параметров процесса: свойств материала, угла раствора матрицы, скорости деформирования, смазки, степени обжатия ψ и т. д.

$$\psi = \frac{D^2 - d^2}{D^2} \cdot 100\%,$$

здесь D — диаметр сечения контейнера,
 d — диаметр калибрующегося сечения матрицы.

Напряжения определяли экспериментально-расчетным методом, заключающимся в сочетании методов измерения твердости деформированного металла и делительных сеток [2]. Расчет выполняли на ЭВМ «БЭСМ-4».

Образцы для выдавливания изготавливали высотой $H \approx 1,6D$, из двух симметричных половин, разделенных по меридиональной плоскости. Меридиональные поверхности этих образцов доводили до 9 или 10 класса чистоты. На обработанной поверхности одной из половин составного образца наносили алмазным наконечником нормальную сетку с базой 1—2 мм. Базу сетки выбирали с учетом величины обжатия и угла раствора матрицы.

Составные образцы выдавливали со смазкой в специальном контейнере на 500-тонном гидравлическом прессе. В установившейся стадии выдавливания при постоянном усилии деформирования процесс

прекращали, образец извлекали из контейнера и разделяли на две половины.

Меридиональную поверхность одной половины выдавленного образца готовили для измерения твердости по Виккерсу, с другой половины снимали увеличенную в 10 раз на проекторе деформированную сетку. Затем на увеличенную деформированную область наносили нормальную сетку с постоянным шагом. Величину шага выбирали таким образом, чтобы на радиус контейнера вписывалось целое число шагов, а число узлов нормальной сетки было не менее 10. В дальнейшем расчет приращений деформаций и напряжений проводили по узлам наложенной сетки.

Если в установившейся стадии пластического деформирования некоторое семейство линий в недеформированном металле ориентировано вдоль оси выдавливания, то эти линии, деформируясь, преобразуются в траектории расположенных на них частиц относительно стенок контейнера и матрицы.

Модуль скорости этих частиц можно определить по предварительно нанесенным отметкам, а вектор скорости частиц направлен по касательной к их траектории.

Если на линии, ориентированной вдоль оси выдавливания, нанести через равные промежутки a_0 отметки, то в своем движении относительно инструмента точка 1 занимает положение точки 2, точка 2 — положение точки 3 и т. д. (рис. 1) за один и тот же промежуток времени.

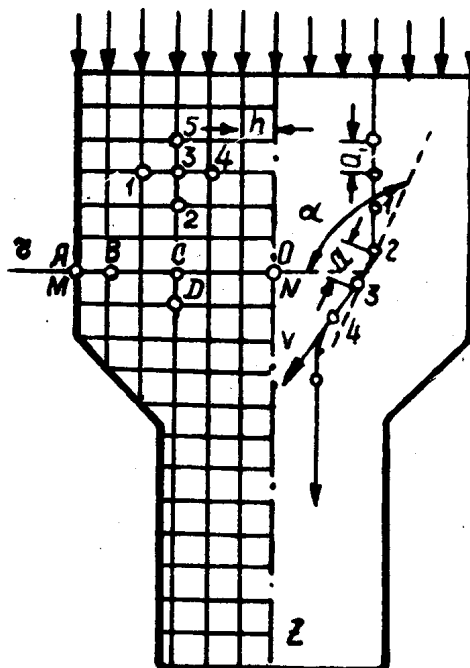


Рис. 1. Схема осесимметричного выдавливания для расчета приращений деформаций.

$$\Delta t = \frac{a_0}{v_0} \quad (1)$$

Относительная скорость перемещения частиц

$$v = \frac{a}{\Delta t} = v_0 \frac{a}{a_0}, \quad (2)$$

где a — расстояние между отметками после деформирования.

Составляющие этих скоростей в цилиндрической системе координат

$$v_r = v \cdot \cos \alpha, \quad v_z = v \cdot \sin \alpha, \quad (3)$$

где α — угол наклона касательной к траектории частицы, отсчитываемый от координаты r в положительном направлении.

Значения приращений деформаций определяли по искажению нормальной сетки, выставленной так, что одно семейство линий ориентировано вдоль оси выдавливания.

При осесимметричной деформации компоненты тензора деформации равны

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varepsilon}_r &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = \frac{v_0}{a_0} \left(\frac{\partial a}{\partial r} \cos \alpha - a \cdot \sin \alpha \frac{\partial \alpha}{\partial r} \right), \\ \dot{\varepsilon}_z &= \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{v_0}{a_0} \left(\frac{\partial a}{\partial z} \sin \alpha + a \cdot \cos \alpha \frac{\partial \alpha}{\partial z} \right), \\ \dot{\gamma}_{rz} &= \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} = \frac{v_0}{a_0} \left[\cos \alpha \left(\frac{\partial a}{\partial z} + a \frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) + \right. \\ &\quad \left. + \sin \alpha \left(\frac{\partial a}{\partial r} - a \frac{\partial \alpha}{\partial z} \right) \right], \\ \dot{\varepsilon}_\varphi &= \frac{v}{r} \cos \alpha = \frac{v_0}{a_0} \cdot \frac{a}{r} \cos \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Учитывая, что в дальнейшем постоянный множитель в соотношениях (4) сокращается, далее определяли приращения деформаций:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij} \cdot \Delta t. \quad (5)$$

Производные определяли по соотношениям [3]:

а) производные на оси

$$\left(\frac{\partial a}{\partial r} \right)_0 = \frac{-3a_0 + 4a_1 - a_2}{2 \cdot h}, \quad \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right)_0 = \frac{-3\alpha_0 + 4\alpha_1 - \alpha_2}{2 \cdot h};$$

б) производные на границе

$$\left(\frac{\partial a}{\partial r} \right)_0 = \frac{a_{n-2} - 4a_{n-1} + 3a_n}{2 \cdot h}, \quad \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right)_n = \frac{\alpha_{n-2} - 4\alpha_{n-1} + 3\alpha_n}{2 \cdot h},$$

в) промежуточные производные

$$\left(\frac{\partial a}{\partial r} \right)_3 = \frac{a_1 - a_4}{2 \cdot h}, \quad \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right)_3 = \frac{\alpha_1 - \alpha_4}{2 \cdot h}, \quad (6)$$

где h — база расчетной сетки.

По подобным соотношениям определяли производные в направлении координаты z .

Приращение интенсивности деформаций

$$\Delta \varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\Delta \varepsilon_r^2 + \Delta \varepsilon_z^2 + \Delta \varepsilon_r \cdot \Delta \varepsilon_z + \frac{\Delta \gamma_{rz}^2}{4}}. \quad (7)$$

Компоненты девиатора напряжений вычисляли по соотношениям:

$$\begin{aligned} S_r &= \sigma_r - \sigma = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} \Delta \varepsilon_r, \quad S_z = \sigma_z - \sigma = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} \Delta \varepsilon_z, \\ S_\varphi &= \sigma_\varphi - \sigma = \frac{2}{3} \frac{\sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} \Delta \varepsilon_\varphi, \quad \tau_{rz} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\Delta \varepsilon_i} \Delta \gamma_{rz}, \end{aligned}$$

здесь σ — гидростатическое давление.

Для определения в узлах расчетной сетки характеристики α строили изолинии α . Значения α определяли непосредственным измерением: без

построения изолиний. Интенсивность напряжений σ_i в пластической области определяли по распределению твердости из тарировочной кривой, построенной по результатам испытания материала на сжатие со смазкой.

Исходные данные a , α и σ_i задаются тремя массивами построчно. Разделение строк осуществляется пустой ячейкой, массивов — двумя пустыми ячейками. Указанный способ ввода исходных данных позволяет одним блоком программы установить границы, т. е. определить число узлов расчетной сетки в направлении координаты r и координаты z .

В программе предусмотрена стандартная подпрограмма вычисления производных функций, заданных таблично. Достаточно переслать значение какой-либо строки или столбца в рабочее поле стандартной подпрограммы и, обратившись к последней, вычисляются производные по координате r или z . Так определяются в массиве производные:

$$\frac{\partial a}{\partial r}; \frac{\partial a}{\partial z}; \frac{\partial \alpha}{\partial r}; \frac{\partial \alpha}{\partial z}.$$

Далее вычисляются два массива $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$ и определяются приращения деформации — $\Delta \varepsilon_r$; $\Delta \varepsilon_z$; $\Delta \varepsilon_\varphi$; $\Delta \gamma_{rz}$ и $\Delta \varepsilon_i$, затем компоненты девиатора напряжений — s_r ; s_z ; s_φ ; τ_{rz} .

Во второй части программы вычисляются напряжения. Определив из условия равновесия [2] граничное напряжение в контакте заготовки с матрицей, машина вычисляет все напряжения в узлах расчетной сетки на этом радиусе. Полученные напряжения на радиусе используются в качестве граничных условий. Это позволяет вычислить напряжения во всем массиве.

На печать машина выдает следующую информацию:

- 1) все исходные данные, вводимые для расчета: усилие выдавливания P в кг; шаг расчетной сетки — h ; a ; α ; σ_i ;
- 2) приращение деформаций — $\Delta \varepsilon_r$; $\Delta \varepsilon_z$; $\Delta \varepsilon_\varphi$; $\Delta \gamma_{rz}$; $\Delta \varepsilon_i$;
- 3) компоненты девиатора напряжений — s_r ; s_z ; s_φ ;
- 4) напряжения — σ_1 ; σ_3 ; σ ; σ_r ; σ_z ; τ_{rz} .

Имея всю вводимую информацию, промежуточные и окончательные результаты, можно проверить правильность выполненных машиной вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Мишунин, Л. М. Решетникова и др. Качество и точность деталей при холодном выдавливании. «Кузнечно-штамповочное производство», 1971, № 9.
2. Г. Д. Дель, В. А. Огородников. Экспериментально-аналитическое исследование напряженного состояния при осесимметричном прессовании упрочняющегося металла. Изв. вузов, «Машиностроение», 1969, № 2.
3. Б. П. Демидович, И. А. Марон. Основы вычислительной математики. М., 1963.