Е.И.Вербицкий, И.Н.Мехед, В.А.Чайка.

УДК 620.178.7

СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПЛОСКОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ УДАРЕ

В исследовании процессов высокоскоростного деформирования большую роль играет упрочнение изделий. Знание законов изменения сопротивления деформации дает возможность расчитывать усилие и энергию деформирования, наиболее полно использовать механические и пластические свойства металлов при эксплуатации деталей машин.

Упрочняющий эффект описывается кривыми деформационного упрочнения, для построения которых наиболее часто используют испытания на растяжение, реже – на сжатие. Применение этих методов при высокоскоростном деформировании затрудняется сложностью регистрирования усилий, причем особая трудность возникает при попытке учесть влияние схемы напряженного состояния.

В настоящей работе предлагается метод определения сопротивления деформации при испытании на удар о гладкую жесткую плиту. Этот вид испытания наиболее полно отражает процесс высокоскоростного деформирования при осадке и штамповке.

Предлагаемый метод дает возможность, используя схему плоского напряженного состояния при ударе, которая может быть осуществлена в плоскости симметрии составного призматического образца с отношением высоты к ширине $H:2B=1:1$, определить поле напряжений в этой плоскости, не прибегая к сложным измерениям, а лишь используя координатную сетку, нанесенную на плоскость стыковки (симметрии).

Для определения напряженного состояния вдоль оси призматического образца при ударе о гладкую жесткую плиту воспользуемся приближенным решением уравнений движения [1], [2]:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}=\rho a_x, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}=\rho a_y,$$

При плоском пластическом ударе о жесткую плиту максимальное сдвигающее напряжение $\tau_{k\,max}$ в особой точке контактной поверхности может быть определено [3] :

$$\tau_{k\,max} = \mu K_\sigma = K_\sigma \cdot \cos 2\varphi \, , \qquad (2)$$

где μ – коэффициент трения;
K_σ – предел текучести с учетом упрочнения;
φ – угол между касательной к линии скольжения, в данной точке и положительным направлением оси OX.

Используя экспериментальное исследование распределения сдвиговых деформаций (γ_{xy}) при плоском ударе о жесткую плиту, с учетом (2) примем апроксимацию сдвигающих напряжений в виде

$$\tau_{xy} = \mu K_\sigma \frac{x y^3}{B H^3} \, . \qquad (3)$$

Так как ускорение точек, лежащих на контактной поверхности, $a_{y\,max} = const$, то ускорение любой точки образца может быть определено уравнениями

$$a_y = \frac{V_0^2}{2 S_y} \, ; \qquad a_x = -\frac{X \varepsilon_y V_0^2}{S_{y\,max}^2} \, , \qquad (4,а,б)$$

где V_0 – скорость образца в начальный момент удара;
S_y – перемещение соответствующей точки образца с координатами x, y относительно контактной поверхности;
ε_y – степень деформации в данной точке;
$S_{y\,max} = H - h$ – разность начальной и конечной высот образца.

Подставляя уравнения (3;4,а,б) в систему (I) и интегрируя после преобразования, получим

$$\sigma_x = \rho \frac{V_0^2 \cdot \varepsilon_y}{2 \cdot S_{y\,max}^2} \left(B^2 - x^2\right) + \frac{\mu K_\sigma}{2 B H^3} \left(B^2 - x^2\right) 3 y^2 \, ;$$

$$\sigma_y = \rho \frac{V_0^2}{2} F(y) - \frac{\mu K_\sigma}{4 B H^3} y^4 \, . \qquad (5)$$

Полагая, что на контактной поверхности $K_\sigma = const$, в точке с координатами $x = 0; \ y = H; \ \sigma_x = \sigma_2; \ \sigma_y = \sigma_1$. Уравнения движения этой точки могут быть записаны в виде

$$\sigma_1 + \mu K_\sigma \frac{H^4}{4BH^3} = \rho \frac{V_0^2}{2} F(H);$$

$$\sigma_2 + \mu K_\sigma \frac{3H^2B^2}{2BH^3} = \rho \frac{V_0^2}{2} \frac{B^2 \varepsilon_H}{S_{y\,max}^2}. \tag{6}$$

Решая систему уравнений (6) совместно с уравнением пластичности [4]

$$\sigma_1 - \sigma_2 - 2K_\sigma = 0, \tag{7}$$

получим для образца и размерами $H = 2B$

$$K_\sigma = \frac{4}{8+5\mu} \rho \frac{V_0^2}{2} \left(F(H) - \frac{\varepsilon_H B^2}{S_{y\,max}^2} \right) \tag{8}$$

Подставляя уравнение (8) в систему (5) для точек, лежащих на оси симметрии (x = o), можно записать

$$\sigma_1 = \rho \frac{V_0^2}{2} F(y) - \frac{4\mu}{8+5\mu} \rho \frac{V_0^2}{2} \left(F(H) - \frac{\varepsilon_H B^2}{S_{y\,max}^2} \right) \frac{y^4}{4BH^3};$$

$$\sigma_2 = \rho \frac{V_0^2}{2} \frac{\varepsilon_y B^2}{S_{y\,max}^2} + \frac{4\mu}{8+5\mu} \rho \frac{V_0^2}{2} \left(F(H) - \frac{\varepsilon_H B^2}{S_{y\,max}^2} \right) \frac{3y^2}{2BH^3} B^2.$$

Значение сопротивления деформации или динамического предела текучести с учетом схемы напряженного состояния в точках, лежащих на оси симметрии, может быть определено как

$$\sigma_g = \sigma_1 - \sigma_2 = \rho \frac{V_0^2}{2} \left[\left(F(y) - \frac{\varepsilon_y B^2}{S_{y\,max}^2} \right) - \right.$$

$$\left. - \frac{4\mu}{8+5\mu} \left(F(H) - \frac{\varepsilon_H B^2}{S_{y\,max}^2} \right) \cdot (y^2 + 6B^2) \frac{y^2}{4BH^3} \right]. \tag{10}$$

Принимая $A = \frac{B^2}{S_{y\,max}^2}$; $C = \frac{\mu}{(8+5\mu)BH^3}$, уравнение (10) может быть представлено в виде

$$\sigma_y = \rho \frac{V_0^2}{2}\left[(F(y) - A\varepsilon_y) - \zeta(F(H) - A\varepsilon_H)(y^2 + 6B^2)\right] \tag{11}$$

Функции $F(y) = \int_0^y \frac{dy}{S_y}$; $F(H) = \int_0^H \frac{dy}{S_y}$ могут быть вычислены графическим интегрированием зависимости $S = f(y)$. Значения ε_y и ε_H определяются замером координатной сетки. Величина $\mu = \cos 2\varphi$ определяется из соотношения $tg 2\varphi = \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_x}{\gamma_{xy}}$, а $\varepsilon_y, \varepsilon_x, \gamma_{xy}$ вблизи особой точки – по деформации координатной сетки.

Литература

1. К а ч а н о в Л.М. Основы теории пластичности. М., "Наука", 1969.

2. А л е к с а н д р о в Е.В., С о к о л о в с к и й В.Б. Прикладная теория и расчет ударных систем. М., "Наука, 1969.

3. М а к у ш о к Е.М., М а т у с е в и ч А.Е., С е в е р д е н к о В.П., С е г а л В.М. Теоретические основы ковки и горячей объемной штамповки. Минск, "Наука и техника, 1968.

4. С т о р о ж е в М.В., П о п о в Е.А. Теория обработки металлов давлением. М., Машгиз, 1969.