

В.А. АНАНЯН

ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ НА КРОМКЕ ОТВЕРСТИЯ И РАБОТА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ПРОБИВКЕ ТОНКОЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ

На основе теории пластического течения получены уравнения деформированного состояния в очаге деформации на кромке отверстия после магнитно-импульсной пробивки метанием тонколистовой заготовки по матрице. Получено уравнение работы деформации, которое позволяет рассчитать запасаемую электроэнергию в конденсаторной батарее магнитно-импульсной установки (МИУ).

Ключевые слова: кромка отверстия, магнитно-импульсное деформирование, тонколистовая заготовка.

Штамповка энергией импульсного магнитного поля (ИМП) имеет ряд преимуществ перед известными способами. Особенно эффективно деформирование тонколистовых электропроводных заготовок. Склонность тонкой заготовки к искривлениям, трудность обеспечения надежного прижима по матрице, особенно по малой опорной площадке, необходимость выдерживания зазора между матрицей и пуансоном, невозможность осуществления разделительных операций при движении и др. - все это создает трудности для обычных методов деформирования.

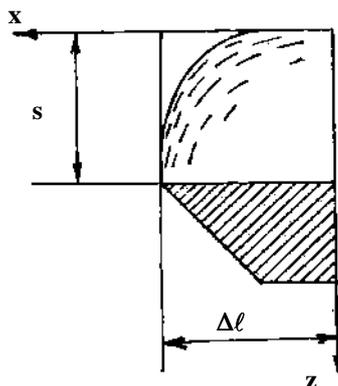


Рис.1. Скольжение слоев материала

Целью настоящей работы является выявление характерных особенностей напряженно-деформированного состояния на контуре раздела получаемых деталей, а также определение работы деформирования при вырубке-пробивке метанием тонколистовой заготовки по матрице.

Экспериментальные исследования [2] показали, что в процессе разделения метанием ИМП тонколистовой заготовки по матрице происходит формирование внешней формы очага деформации на кромке будущего отверстия в поверхность, близкую к цилиндрической. В очаге же вырубавшейся напровал в отверстие матрицы высечки [1] этого не наблюдается из-за различия условий течения частиц материала. Эти частицы не имеют опоры по матрице, и поэтому действие на них сил инерции, а в начальной стадии разделения и действия импульсного магнитного поля (ИМП) способствует смещению всего очага, но не столько течению частиц в очаге. Часть очага деформации, остающейся над острой кромкой матрицы (рис. 1), не имеет возможности при соударении о матрицу сместиться, поэтому частицы материала в очаге, испытывая резкое гашение скорости, сжимаются к матрице остаточными силами инерции. Силы инерции частиц верхних слоев материала на кромке отверстия обусловлены остаточными скоростями $-V_{oc}$ (для алюминиевых заготовок толщины $0,1...1$ мм $v_{oc} = v_0 / n$, где V_0 – скорость соударения, $n = 3...8$). Поверхностные слои металла более подвижны, нежели внутренние, поэтому происходит деформация скольжения металла относительно друг друга по некоторым дугам, близким к дугам окружностей с центром в точке ($x = 0, z = s$, рис. 1).

Представим скорость перемещения частиц в очаге деформации по оси z в виде

$$v_z = v_{oc} f(x) \varphi(z), \quad (1)$$

где V_{oc} – остаточная скорость характерной точки ($x = \Delta l, z = 0$); Δl – ширина очага деформации; x, z – координаты частиц в очаге деформации.

Характер течения частиц на кромке отверстия позволяет принять $f(x)$ и $\varphi(z)$ в виде

$$f(x) = e^{p(x/\Delta l - 1)}, \quad \varphi(z) = e^{-pz/s}, \quad (2)$$

где s – толщина заготовки; p – некоторый безразмерный параметр.

Уравнение (1) с учетом (2) имеет вид

$$v_z = v_{oc} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}. \quad (3)$$

Из уравнения неразрывности

$$\partial v_x / \partial x + \partial v_z / \partial z = 0 \quad (4)$$

скорость перемещения частиц в очаге деформации по оси x определяется в виде

$$v_x = v_{oc} \frac{\Delta l}{s} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}. \quad (5)$$

Безразмерный коэффициент p находим из следующих соображений. Скорость перемещения частиц незначительна на линии $x = 0$, возрастает с увеличением x , уменьшается с увеличением z и затухает к точке ($x = \Delta l, z = s$).

Примем граничные условия для точек ($x = 0, z = 0$) и ($x = \Delta l, z = s$) $v_z = 0,01v_{oc}$. Тогда из (3) найдем $p = 4,61$. Далее, применяя методику, приведенную в [1] при анализе очага деформации высечки в случае механического разделения заготовки, получим следующие формулы для поля скоростей деформаций:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= v_{oc} \frac{p}{s} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}, \quad \varepsilon_z = -v_{oc} \frac{p}{s} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}, \\ \varepsilon_{xz} &= v_{oc} \frac{p(s^2 - \Delta l^2)}{s^2 \Delta l} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}, \quad \varepsilon_i = v_{oc} \frac{p(s^2 + \Delta l^2)}{\sqrt{3}s^2 \Delta l} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Коэффициент жесткости принимает вид

$$\mu_i = \frac{\sigma_s s^2 \Delta l}{\sqrt{3} v_{oc} p (s^2 + \Delta l^2)} e^{-p(x/\Delta l - z/s - 1)}. \quad (7)$$

Деформации имеют вид

$$\begin{aligned} e_x &= \frac{ph'_c}{2s} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}, \quad e_z = \frac{ph'_c}{2s} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}, \\ e_{xz} &= \frac{ph'_c (s^2 - \Delta l^2)}{s^2 \Delta l} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}, \\ e_i &= \frac{ph'_c \sqrt{s^4 - s^2 \Delta l^2 + \Delta l^4}}{\sqrt{3}s^2 \Delta l} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $h'_c = \int_t v_{oc} dt$ – перемещение характерной точки ($x = \Delta l, z = 0$) за время деформации очага после разделения заготовки.

Максимальное касательное напряжение, вызывающее движение вязкопластического металла, имеет вид

$$\tau'_{max} = \mu_B \varepsilon_m, \quad (9)$$

где μ_B – коэффициент вязкости металла; ε_m – максимальная скорость скольжения.

Максимальная скорость скольжения находится по формуле

$$\varepsilon_m = \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + \varepsilon_{xz}^2} = v_{oc} \frac{p(s^2 + \Delta l^2)}{s^2 \Delta l} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}. \quad (10)$$

На основании гипотезы, положенной в основу условия вязкопластической деформации, максимальное касательное напряжение является линейной функцией максимальной скорости и всегда больше некоторой постоянной

величины k' . По условию постоянства разности главных напряжений $k' = \sigma_s / 2$, по энергетическому условию пластичности - $k' = \sigma_s / \sqrt{3}$.

Условием вязкопластической деформации будет

$$\tau_m = k' + \mu_v \varepsilon_m. \quad (11)$$

Выражение (11) с учетом (10) принимает вид

$$\tau_m = k' + v_{oc} \frac{\mu_v p (s^2 + \Delta l^2)}{s^2 \Delta l} e^{p(x/\Delta l - z/s - 1)}. \quad (12)$$

Работа деформирования. В процессе разделения тонколистовой заготовки по схеме метания ее к матрице энергия затрачивается на пластическую деформацию в локализованном объеме с разрушением материала, деформацию вытяжки втягиваемого в отверстие матрицы участка, деформацию соударяемых поверхностей и изгиба граничной с этой областью участка (рис.2). В конечный момент времени кинетическая энергия переходит в работу необратимого формоизменения. Работу необратимого деформирования можно определить по формуле [3]

$$A = \iiint_V \int_t E dV dt, \quad (13)$$

где E – функция работы.

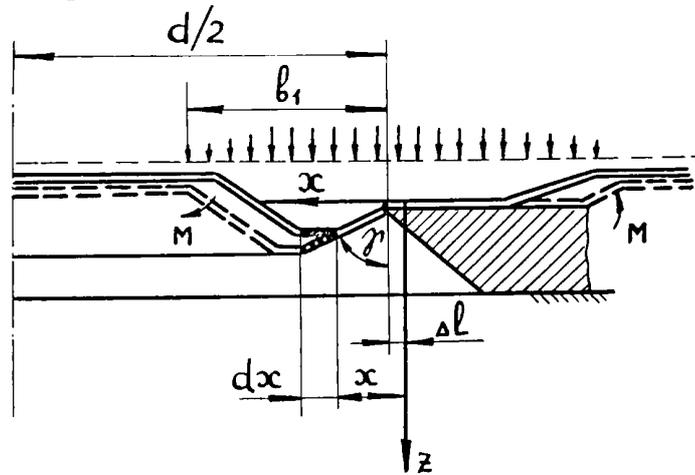


Рис. 2. Схема искривления вырубавшейся высечки с вытяжкой кольцевых элементов

Функция работы для плоской задачи определяется зависимостью

$$E = \mu_i (2\varepsilon_x^2 + 2\varepsilon_z^2 + \varepsilon_{xz}^2). \quad (14)$$

С учетом выражения коэффициента жесткости и скорости деформации [1] для очага на высечке зависимость функции работы будет иметь вид

$$E = \frac{\sigma_s (1 - \phi_1) v_{од} \Phi}{\sqrt{3} s^2 \Delta l}, \quad (15)$$

$$\Phi =$$

$$= \sqrt{14x^2(s-z)^2 + x^4 + (s-z)^4 + 2[x^2 - (s-z)^2]s^2/(1-\varphi_1) + s^4/(1-\varphi_1)^2},$$

где x, z – координаты частиц в очаге деформации высечки.

Работа деформации в очагах деформации высечки и пробитой детали (принимая, что эти работы равны) может быть предварительно определена по формуле

$$A_o = 2\pi d \int_0^{\Delta l} \int_0^s \int_t \frac{\sigma_s (1-\varphi_1) v_{од}}{\sqrt{3} s^2 \Delta l} \Phi dx dz dt. \quad (16)$$

Дополнительную работу от сил инерции при вязкопластической деформации по формуле (13) после интегрирования ее с учетом (6), (7), (14) можно представить в следующем виде:

$$A_{вп} = \frac{\sigma_s \pi d h'_c (\Delta l^2 + s^2) (1 - e^{-p})^2}{\sqrt{3} s p}. \quad (17)$$

Определим работу на деформацию при вытяжке прогнутой зоны, втягиваемой в отверстие матрицы высечки, учитывая схему искривления заготовки (рис.2). Приняв, что деформирование происходит без упрочнения ($\sigma_i = \sigma_s = \text{const}$) и что тангенциальная деформация $\varepsilon_\theta = 0$, можно определить работу пластической деформации элементарного кольцевого элемента:

$$\begin{aligned} dA_B &= \sigma_i \varepsilon_i dV = \frac{4\pi}{\sqrt{3}} \sigma_s \varepsilon_x s \left(\frac{d}{2} + \Delta l - x \right) dx = \\ &= \frac{4\pi}{\sqrt{3}} \sigma_s s \left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right) \left(\frac{d}{2} + \Delta l - x \right) dx, \end{aligned} \quad (18)$$

где $\varepsilon_x = \frac{dx / \sin \gamma - dx}{dx}$ – деформация в меридиональном направлении; $(d/2 + \Delta l - x)$ – текущий радиус очага пластической деформации при вытяжке; dV – объем очага пластической деформации; γ – угол между образующей втягиваемой части заготовки и вертикалью.

Из (18) работа деформации на вытяжку принимает вид

$$\begin{aligned} A_B &= \int_{\Delta l}^{\Delta l + b_1} \frac{4\pi}{\sqrt{3}} \sigma_s s \left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right) \left(\frac{d}{2} + \Delta l - x \right) dx = \\ &= \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \sigma_s s b_1 \left(\frac{d}{2} - b_1 \right) \left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right). \end{aligned} \quad (19)$$

Работа изгибающих моментов незначительна из-за тонкости заготовки и малого угла изгиба за время пробивки [4].

Работу деформации в очагах на пробитой и вырубленной направал в

отверстие матрицы части заготовки с учетом работы на деформацию вытяжки можно представить в виде

$$A_d = A_o + A_b + A_{вп} = 2\pi d \int_0^{\Delta l} \int_0^s \frac{\sigma_s (1 - \varphi_1) v_{од}}{\sqrt{3s^2 \Delta l}} \Phi dx dz dt + \\ + \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \sigma_s s b_1 \left(\frac{d}{2} - b_1 \right) \left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right) + \frac{\sigma_s \pi d h'_c (\Delta l^2 + s^2) (1 - e^{-p})^2}{\sqrt{3} s p}. \quad (20)$$

Если учесть принятую ранее в [1] аппроксимацию, после интегрирования выражение (20) принимает вид

$$A_d = \frac{\pi d \sigma_s h_c (1 - \varphi_1)}{3\sqrt{3s^2 \Delta l}} \left[(s + \Delta l)^4 - s^4 - \Delta l^4 + \frac{12\Delta l s^3}{1 - \varphi_1} \right] + \\ + \frac{2\pi}{\sqrt{3}} \sigma_s s b_1 \left(\frac{d}{2} - b_1 \right) \left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right) + \frac{\sigma_s \pi d h'_c (\Delta l^2 + s^2) (1 - e^{-p})^2}{\sqrt{3} s p}. \quad (21)$$

Выражения (20) и (21) могут быть использованы для определения запасаемой в конденсаторной батарее энергии. Исходя из опыта по пробивке заготовок ИМП, установлено, что КПД процесса пробивки обычно лежит в пределах $\eta_{пц} = 2...4\%$ от запасаемой в конденсаторной батарее энергии W_0 , которая в первом приближении может быть определена как

$$W_0 = W_{my} / k_{oc} \eta, \quad (22)$$

где $W_{my} = \sum \frac{\Delta m_k v_k^2}{2}$ – кинетическая энергия метаемого участка в момент соударения, которая условно принята равной энергии, передаваемой магнитным полем на заготовку; η – коэффициент, учитывающий особенности концентрации поля и эффективность использования энергии поля в работу деформации; k_{oc} – коэффициент, учитывающий неполное затухание волн в тонкой заготовке.

С другой стороны, W_{my} можно записать в виде $W_{my} = W_{пж} + W_d + W_{выс}$, где $W_{пж}$ – энергия, затрачиваемая на прижим заготовки с матрицей; $W_d = A_d$ – энергия, затрачиваемая на работу деформирования; $W_{выс} = \frac{m_{выс} v_{выс}^2}{2}$ – кинетическая энергия высечки, выстреливаемой в отверстие матрицы.

При симметричном нагружении заготовки по обе стороны от режущей кромки матрицы $W_{пж} = W_d + W_{выс}$. Тогда, зная из опыта деформирования величину $W_{выс}$, можно W_{my} выразить через $W_{my} = 2(W_d + W_{выс})$, а запасаемую энергию в виде $W_0 = \frac{2(W_d + W_{выс})}{k_{oc} \eta}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ананян В.А.** Напряженно-деформированное состояние в локализованном очаге деформации при магнитно-импульсной вырубке тонколистовой заготовки // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2002. – Т.55, №2. – С. 308-315.
2. **Кононенко В.Г., Ананян В.А.** Экспериментальные исследования к анализу процессов вырубки-пробивки тонколистовой заготовки импульсным магнитным полем, сконцентрированным по контуру вырубки // Самолетостроение. Техника воздушного флота. - Харьков, 1980. - Вып. 477. - С. 112-118.
3. **Погодин-Алексеев Г.Н.** Свойства металлов при ударном нагружении.-М.: Металлургиздат, 1953. – 356 с.
4. **Сторожев М.В., Попов Е.А.** Теория обработки металлов давлением.-М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

АрмСХА. Материал поступил в редакцию 15.05.2001.

Վ.Ա. ԱՆԱՆՅԱՆ

ՄԱԳՆԻՏԱ - ԻՄՊՈՒԼՍԱՑԻՆ ԾԱԿՈՏՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ ԲԱՐԱԿԹԻԹԵՂՅԱ ՊԱՏՐԱՍՏՈՒԿՈՒՄ ՍՏԱՑՎԱԾ ԱՆՑՔԻ ԵԶՐԱՇԵՐՏԻ ԴԵՖՈՐՄԱՑՎԱԾ ՕԶԱԽԻ ՎԻՃԱԿԸ ԵՎ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՅԻ ԱՇԽԱՏԱՆՔԸ

Մագնիսա-իմպուլսային ծակոտման դեպքում բարակթիթեղյա պատրաստուկի նետումով մատրիցի վրա ստացված անցքի եզրաշերտի դեֆորմացված օջախի համար պլաստիկ հոսունության տեսության հիման վրա ստացված են դեֆորմացիոն վիճակի հավասարումները: Ստացված է դեֆորմացիայի աշխատանքի բանաձևը, որն օգտագործելի է մագնիսա-իմպուլսային սարքի էլեկտրական մարտկոցի անհրաժեշտ պաշարը հաշվարկելիս:

V.A. ANANYAN

STRAINED STATE IN HOLE EDGE DEFORMATION CENTRE AFTER MAGNETO-IMPULSE PIERCING THIN-SHEETED WORK

Based on plastic flow theory the strained state equations are obtained in the hole edge deformation centre after magneto-impulse piercing by throwing a thin-sheeted bar along the matrix. The deformation work equation which allows to calculate electric energy to be stored in magneto-impulse installation capacitor bank is established.