ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2002. Т. LV, № 2.

УДК 539.02 СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

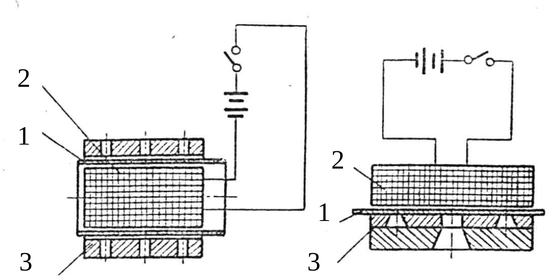
В.А. АНАНЯН

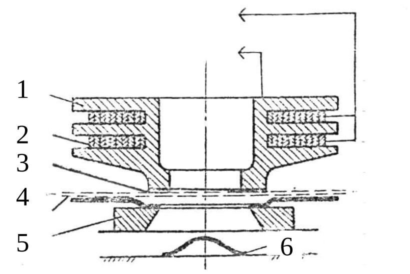
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ В ЛОКАЛИЗОВАННОМ ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ВЫРУБКЕ ТОНКОЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ

На основе теории пластического течения выведены уравнения и расчетные формулы напряженно-деформированного состояния в очаге деформации на кромке вырубаемой высечки при магнитно-импульсной вырубке и пробивке метанием тонколистовой заготовки по матрице.

Ключевые слова: магнитно-импульсный, вырубка, пробивка, тонколистовая заготовка.

При вырубке-пробивке импульсным магнитным полем (ИМП) электропроводная металлическая заготовка 1 (рис.1) помещается в сильное ИМП, создаваемое на катушку индуктивности 2 разрядом электроэнергии, накопленной в конденсаторной батарее. Деформирование осуществляется давлением ИМП по





матрице 3.

Практически при больших энергиях разряда для повышения индуктивности индуктора и во избежание разрыва обмотки последняя заканчивается массивным витком-концентратором (рис.2). Обычно эффективно деформирование тонколистовых (*s*=0,1…1 *мм*) электропроводных заготовок.

При исходном расположении тонколистовой заготовки с зазором (≈5 *мм*) к матрице (рис.2) происходит выстреливание давлением поля участка заготовки по матрице, при этом деформирование осуществляется за счет кинетической энергии соударения (скорость соударения достигает 600 *м/с* и более) и давления ИМП.

Рисх1хСхема пробивки и вырубки ИМП: 1 – заго2овка; 2 – инд3к2ор; 3 – ма2рица

Рисх2хСхема пробивки и выр3бки с помощью концен2ра2ора ИМП: 1 – концен2ра2ор; 2 – обмо2ка; 3 – изоляция;я4 – заго2овка;яя 5 – ма2рица;я6 – высечка

Целью настоящей статьи является выявление характерных особенностей напряженно-деформированного состояния на контуре раздела получаемых деталей, а также определение работы деформирования при вырубке-пробивке метанием тонколистовой заготовки по плоской матрице. Результаты исследований позволяют судить о приемлемости состояния деформированного металла в условиях эксплуатации, а также выявить возможность использования их для расчета энергосиловых параметров технологического процесса.

Рассмотрим очаг деформации на высечке (рис.3). Скорость перемещения частиц в очаге деформации представим в виде произведения двух функций, каждая из которых зависит только от одного аргумента

$$v_z = -v_{од} f(x)\varphi(z), \tag{1}$$

где $v_{ОД}$ – скорость внедрения острой кромки матрицы в заготовку; $\varphi(z)$ – функция, выражающая закон изменения скорости перемещения частиц по оси z; $f(x)$ – функция, определяющая промежуточную форму очага деформации.

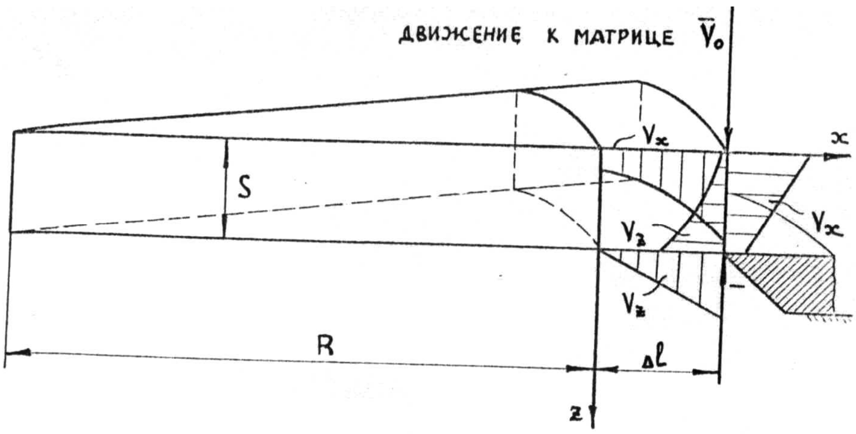


Рис.3. Распределение поля скоростей в очаге деформации

На основании экспериментальных исследований [1] характера течения частиц металла в очаге деформации $f(x)$ и $\varphi(z)$ запишем в виде

$$f(x) = x/\Delta l, \tag{2}$$

$$\varphi(z) = \varphi_1 + (1-\varphi_1)(2sz - z^2)/s^2. \tag{3}$$

Здесь x, z - координаты частиц; Δl – ширина очага деформации; s –толщина заготовки; φ_1 – некоторый малый параметр.

Введение параметра φ_1 обусловлено тонкостью заготовки, а следовательно, близостью точек в очаге деформации. С увеличением скорости деформирования разность скоростей перемещения частиц, очевидно, уменьшается и φ_1 увеличивается.

Уравнение (1) с учетом (2) и (3) примет вид

$$\text{v}_z = -\text{v}_{\text{од}} \left[\varphi_1 + (1-\varphi_1)(2sz - z^2)/s^2 \right] x/\Delta l \,. \tag{4}$$

Для решения задачи определения напряженно-деформированного состояния материала воспользуемся известными уравнениями пластического деформирования металлов, развитых в работах [2-4].

Запишем уравнение неразрывности плоской задачи:

$$\partial \text{v}_x / \partial x + \partial \text{v}_z / \partial z = 0 \,. \tag{5}$$

После интегрирования (5), с учетом производной выражения (4), получим

$$\text{v}_x = \text{v}_{\text{од}} (1-\varphi_1)(s-z) x^2 / (s^2 \Delta l) + C_1 \,. \tag{6}$$

Постоянную интегрирования находим из условия: при $x = 0$ $\text{v}_x = \varphi_2 \text{v}_{\text{од}}$, тогда из (6) $C_1 = \varphi_2 \text{v}_{\text{од}}$. Здесь φ_2 - некоторый параметр, зависящий от материала заготовки, ее толщины и конкретных условий процесса.

С учетом C_1 равенство (6) примет вид

$$\text{v}_x = \text{v}_{\text{од}} \left[\varphi_2 + (1-\varphi_1)(s-z) x^2 / (s^2 \Delta l) \right]. \tag{7}$$

Значение φ_2 находим из (7), принимая для точки $(x = \Delta l,\ z = s)$ $\text{v}_x / \text{v}_{\text{од}} \le 1$, тогда $\varphi_2 \le 1$.

Поле скоростей деформации запишется в виде

$$\varepsilon_x = \frac{\partial \text{v}_x}{\partial x} = \frac{2\text{v}_{\text{од}} (1-\varphi_1)(s-z)x}{s^2 \Delta l}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial \text{v}_z}{\partial z} = -\frac{2\text{v}_{\text{од}} (1-\varphi_1)(s-z)x}{s^2 \Delta l},$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{\partial \text{v}_x}{\partial z} + \frac{\partial \text{v}_z}{\partial x} = \frac{-\text{v}_{\text{од}} (1-\varphi_1)}{s^2 \Delta l} \left(\frac{\varphi_1 s^2}{1-\varphi_1} + x^2 + 2sz - z^2 \right),$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{4\varepsilon_x^2 + \varepsilon_{xz}^2} = \frac{\text{v}_{\text{од}} (1-\varphi_1)}{\sqrt{3} s^2 \Delta l} \Phi \,, \tag{8}$$

$\Phi = \sqrt{14x^2 (s-z)^2 + x^4 + (s-z)^4 + 2\left[x^2 - (s-z)^2\right] s^2 / (1-\varphi_1) + s^4 / (1-\varphi_1)^2}$. Уравнение связи деформаций со скоростями деформаций имеет вид

$$\frac{\partial e_x}{\partial t} + \text{v}_x \frac{\partial e_x}{\partial x} + \text{v}_z \frac{\partial e_x}{\partial z} = \varepsilon_x, \quad \frac{\partial e_z}{\partial t} + \text{v}_x \frac{\partial e_z}{\partial x} + \text{v}_z \frac{\partial e_z}{\partial z} = \varepsilon_z \,. \tag{9}$$

Из- за кратковременности процесса примем $\partial e / \partial t = 0$.

Из (9) с учетом (4), (7), (8) и после преобразования получим

$$\begin{aligned}
&\left[\frac{\varphi_2 s^2 \Delta l}{(1-\varphi_1)(s-z)x} + x \right] \frac{\partial e_x}{\partial x} - \left[\frac{\varphi_1 s^2}{(1-\varphi_1)(s-z)} + \frac{2sz - z^2}{s-z} \right] \frac{\partial e_x}{\partial z} = 2, \\
&\left[\frac{\varphi_2 s^2 \Delta l}{(1-\varphi_1)(s-z)x} + x \right] \frac{\partial e_z}{\partial x} - \left[\frac{\varphi_1 s^2}{(1-\varphi_1)(s-z)} + \frac{2sz - z^2}{s-z} \right] \frac{\partial e_z}{\partial z} = -2.
\end{aligned} \tag{10}$$

При плоском деформированном состоянии с точностью до знака $e_x = e_z$, поэтому можно рассматривать только одно из уравнений (10), интегрирование которого выполняется с помощью характеристической системы

$$\frac{dx}{\left[x+\varphi_2 s^2\Delta l / x(1-\varphi_1)(s-z)\right]}=$$
$$=\frac{-dz}{\left[(2sz-z^2)/(s-z)+\varphi_1 s^2/(1-\varphi_1)(s-z)\right]}=de_x. \qquad (11)$$

Каждый интеграл системы (11) является решением уравнения (10). Интегрируя (11), получим

$$e_x=\frac{1}{2}\ln\left[x^2+\frac{\varphi_2 s^2\Delta l}{(1-\varphi_1)(s-z)}\right]+C_1,$$
$$e_z=-\frac{1}{2}\ln\left[(s-z)^2-\frac{s^2}{1-\varphi_1}\right]+C_2. \qquad (12)$$

Пусть точка в очаге деформации после деформирования имеет координаты x, z, следовательно, ее координата x_1 до деформации была бы меньше на абсолютную величину перемещения вдоль оси за время деформирования, т.е.

$$x_1=x-\int_t v_x dt=x-\int_t v_{од}\left[\frac{(1-\varphi_1)(s-z)x^2}{s^2\Delta l}+\varphi_2\right]dt. \qquad (13)$$

Интеграл $\int_t v_{од}dt$ можно выразить через перемещение h_c точки $(x=\Delta l,\ z=s)$ за время деформирования

$$\int_t v_{од}dt=h_c. \qquad (14)$$

Из (12) с учетом (14), используя условия $x=x_1,\ e_x=0$, найдем C_1, и после некоторых преобразований одно из уравнений (12) примет вид

$$e_x=-\frac{1}{2}\ln\left\{\left[\frac{h_c^2(1-\varphi_1)(s-z)\varphi_2}{s^2\Delta l}\right]+\left[1-\frac{h_c(1-\varphi_1)(s-z)x}{s^2\Delta l}\right]^2\right\}. \qquad (15)$$

Составляющую e_{xz} с учетом (8) и (14) определим по формуле

$$e_{xz}=\int_t \varepsilon_{xz}dt=-\frac{h_c(1-\varphi_1)}{s^2\Delta l}\left[x^2+2sz-z^2+\frac{\varphi_1 s^2}{1-\varphi_1}\right]. \qquad (16)$$

Интенсивность деформаций для плоской задачи определим по формуле

$$e_i=\frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{4e_x^2+e_{xz}^2}. \qquad (17)$$

При исследовании напряженного состояния примем $\sigma_i=\sigma_s=\text{const}$ (σ_s – приведенный предел текучести с учетом упрочнений). Тогда известные зависимости между напряжениями и скоростями деформаций примут вид

$$\sigma_x - \sigma = \frac{2\sigma_s}{3\varepsilon_i}(\varepsilon_x - \varepsilon), \qquad \tau_{xy} = \frac{\sigma_s}{3\varepsilon_i}\varepsilon_{xy};$$

$$\sigma_y - \sigma = \frac{2\sigma_s}{3\varepsilon_i}(\varepsilon_y - \varepsilon), \qquad \tau_{yz} = \frac{\sigma_s}{3\varepsilon_i}\varepsilon_{yz}; \tag{18}$$

$$\sigma_z - \sigma = \frac{2\sigma_s}{3\varepsilon_i}(\varepsilon_z - \varepsilon), \qquad \tau_{xz} = \frac{\sigma_s}{3\varepsilon_i}\varepsilon_{xz},$$

в которых коэффициент жесткости:

$$\mu_i = \sigma_s / 3\varepsilon_i = \sigma_s s^2 \Delta l \Big/ \left[\sqrt{3} V_{ОД}(1-\varphi_1)\Phi\right]. \tag{19}$$

Примем несжимаемость материала заготовки $\varepsilon = 0$, тогда уравнения (18) для плоской задачи $(\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_y = 0)$ получат вид

$$\sigma_x - \sigma = 2\mu_i\varepsilon_x, \quad \sigma_y - \sigma = 0, \quad \sigma_z - \sigma = 2\mu_i\varepsilon_z,$$
$$\tau_{xy} = 0, \quad \tau_{yz} = 0, \quad \tau_{zx} = \mu_i\varepsilon_{zx}. \tag{20}$$

Для определения среднего напряжения используем уравнения движения плоской задачи в проекциях на оси координат:

$$\frac{\partial\sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z} + X\rho = 0 \qquad \left(\text{или} = \rho\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}\right),$$
$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_z}{\partial z} + Y\rho = 0 \qquad \left(\text{или} = \rho\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}\right). \tag{21}$$

Из (20) получим

$$\frac{\partial\sigma_x}{\partial x} = \frac{\partial\sigma}{\partial x} + 2\frac{\partial(\mu_i\varepsilon_x)}{\partial x}, \quad \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} = \frac{\partial(\mu_i\varepsilon_{xz})}{\partial x},$$
$$\frac{\partial\sigma_z}{\partial z} = \frac{\partial\sigma}{\partial z} + 2\frac{\partial(\mu_i\varepsilon_z)}{\partial z}, \quad \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial(\mu_i\varepsilon_{xz})}{\partial z}. \tag{22}$$

В (21) примем объемные силы равными нулю $(X\rho = Y\rho = 0)$. После подстановки (22) с учетом (8) получим

$$\frac{\partial\sigma}{\partial x} = -2\mu_i v_{од}\frac{(1-\varphi_1)(s-z)}{s^2\Delta l} - 4\frac{\partial\mu_i}{\partial x}v_{од}\frac{(1-\varphi_1)(s-z)x}{s^2\Delta l} +$$
$$+\frac{\partial\mu_i}{\partial z}v_{од}\frac{1}{s^2\Delta l}\left[(1-\varphi_1)x^2 + \varphi_1 s^2 + (1-\varphi_1)(2sz - z^2)\right],$$
$$\frac{\partial\sigma}{\partial z} = -2\mu_i v_{од}\frac{(1-\varphi_1)x}{s^2\Delta l} + 4\frac{\partial\mu_i}{\partial z}v_{од}\frac{(1-\varphi_1)(s-z)x}{s^2\Delta l} +$$
$$+\frac{\partial\mu_i}{\partial x}v_{од}\frac{(1-\varphi_1)}{s^2\Delta l}\left[x^2 + 2sz - z^2 + \frac{\varphi_1 s^2}{(1-\varphi_1)}\right]. \tag{23}$$

Уравнение (23) и его частные производные после подстановки μ_i приводят к громоздким выражениям. Для определения среднего напряжения аппроксимируем пространственную диаграмму μ_i зависимостью

$$\mu_i = \frac{\sqrt{3}\sigma_s s^2 \Delta l}{3(1-\varphi_1)\mathrm{v}_{\text{од}}\left[(x+z-s)^2 + s^2/(1-\varphi_1)\right]} . \tag{24}$$

Интенсивность скоростей деформаций с учетом (24) определяется формулой

$$\varepsilon_i = \mathrm{v}_{\text{од}} \frac{(1-\varphi_1)}{\sqrt{3}s^2\Delta l}\left[(x+s-z)^2 + \frac{s^2}{(1-\varphi_1)}\right]. \tag{25}$$

Для нахождения σ ее полный дифференциал запишем в виде

$$d\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial x}dx + \frac{\partial\sigma}{\partial z}dz + d\sigma' . \tag{26}$$

Здесь σ' вводится из-за несуществования полного дифференциала среднего напряжения, т.е.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial\sigma}{\partial z}\right) \neq \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial\sigma}{\partial x}\right). \tag{27}$$

Из (26) с учетом (23) и (24) получим

$$\sigma = \int_0^x \frac{\partial\sigma}{\partial x}\mathrm{dx} + \int_0^z \frac{\partial\sigma}{\partial z}\mathrm{dz} + \sigma' = \frac{\sqrt{3}}{3}\sigma_s \times$$

$$\times\left[\ln\frac{(x+s)^2+\xi}{(s-z)^2+\xi} + 2\frac{z^2-x^2-2sz-\varphi_1\xi}{(x+s-z)^2+\xi} + \right.$$

$$\left. + \frac{2sz-z^2+\varphi_1\xi}{(s-z)^2+\xi} + \frac{x^2-4sx+\varphi_1\xi}{(x+s)^2+\xi}\right] + \sigma', \tag{28}$$

где $\xi = s^2/(1-\varphi_1)$.

Величину σ' определим из граничных условий. Меридиональные напряжения при вытяжке $\sigma_{rr} = \sigma$ равны осредненным по толщине заготовки напряжениям при разделении материала вдоль оси x в начале очага деформации при $x = 0$:

$$\frac{1}{s}\int_0^s (\sigma)\Big|_{x=0} dz = \sigma_{rr} . \tag{29}$$

С учетом (28) после интегрирования (29) получим

$$\sigma' = \sigma_{rr} + \frac{\sqrt{3}}{3}\sigma_s\left[\frac{4}{\sqrt{1-\varphi_1}}\mathrm{arctg}\sqrt{1-\varphi_1} - 3 - \frac{\varphi_1}{2-\varphi_1}\right]. \tag{30}$$

Поле напряжений в очаге деформации при разделительных процессах из (20) с учетом (8) можно представить в виде

$$\sigma_x = \sigma + \frac{4\sigma_s x(s-z)}{\sqrt{3}\Phi}, \ \sigma_z = \sigma - \frac{4\sigma_s x(s-z)}{\sqrt{3}\Phi}, \ \sigma_y = \sigma . \qquad (31)$$

При высоких скоростях нагружения в уравнениях движения (21) следует учесть инерционные силы, вызывающие дополнительные напряжения, связь которых со скоростями, ускорениями и скоростями деформаций определяется из уравнений движения

$$\begin{gathered} \frac{\partial \sigma_{x\,доп}}{\partial x} = \rho_0 \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \sigma_{z\,доп}}{\partial z} = \rho_0 \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} \right). \end{gathered} \qquad (32)$$

Здесь скорости частиц абсолютные, т.е. необходимо учитывать и перемещение самого очага деформации, скорость которого вдоль оси z равна скорости заготовки у режущей кромки, а вдоль оси x определяется из условия, что абсолютная скорость характерной точки $(x = \Delta l, \ z = s)$ в этом направлении равна нулю. Тогда поле скоростей абсолютного движения частиц в очаге деформации с учетом (4), (7) будет иметь вид

$$\begin{gathered} v_x = v_{од} \frac{(1-\varphi_1)(s-z)x^2}{s^2 \Delta l}, \\ v_z = v_{од} - v_{од} \left[\varphi_1 + \frac{(1-\varphi_1)(2sz - z^2)x}{s^2} \right] \frac{x}{\Delta l}. \end{gathered} \qquad (33)$$

После подстановок и интегрирования каждое из выражений для $\sigma_{xдоп}$ и $\sigma_{zдоп}$ можно представить в виде конвективной и локальной составляющей:

$$\sigma_{доп} = \sigma_л + \sigma_к . \qquad (34)$$

Конвективная составляющая обусловлена различием скоростей соседних точек деформируемого тела, а локальная – нестационарностью поля скоростей во времени в данной точке. Выделяя эти составляющие из обоих уравнений, в сумме получим

$$\sigma_л = \rho_0 \frac{\partial v_{од}}{\partial t} \frac{(1-\varphi_1)}{s^2 \Delta l} \left[\frac{(s-z)x^3}{3} + \frac{s^2 \Delta l z}{1-\varphi_1} - \frac{\varphi_1 s^2 xz}{1-\varphi_1} - \left(sz^2 - \frac{z^3}{3} \right) x \right], \qquad (35)$$

$$\sigma_k = \rho_0 \frac{v_{од}^2 (1-\varphi_1)}{s^4 \Delta l} \left\{ (1-\varphi_1) \left[\frac{x^4 s^2}{4} + \frac{x^4 (s-z)^2}{4} + \frac{x^2 z^2}{4} (2s-z)^2 \right] + \right.$$
$$\left. + \varphi_1 s^2 x^2 \left(sz - \frac{z^2}{2} + \frac{x^2}{4} \right) + s^2 \Delta l x \left(z^2 - 2sz - \frac{x^2}{3} \right) \right\}. \qquad (36)$$

Эти составляющие могут не учитываться во многих случаях, когда $v_{од} \le 200$ *м/с* и $\partial v_{од} / \partial t \le 3{,}5 \cdot 10^6$ *м/с²,* что часто имеет место при деформировании с использованием минимально необходимой для процесса энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.
2. **Алексеев Ю.Н.** Вопросы пластического течения металла.- Харьков: ХГУ, 1958. – 111 с.
3. **Попов Е.А., Бочаров Ю.А., Поляк С.М.** и др. Деформирование металлов импульсным магнитным полем // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. - №6. - С. 2-9.
4. **Ильюшин А.А.** Вопросы теории течения пластического вещества по поверхностям // ПММ. – 1954. - Т. XVIII, вып. 3.

АрмСХА.   Материал поступил в редакцию 15.05.2001.

Վ.Ա. ԱՆԱՆՅԱՆ

ԼԱՐՎԱԾԱ-ԴԵՖՈՐՄԱՑԻՈՆ ՎԻՃԱԿԸ ԴԵՖՈՐՄԱՑԻԱՅԻ ՏԵՂԱՅՆԱՑՎԱԾ ՕՋԱԽՈՒՄ ԲԱՐԱԿ ԹԻԹԵՂՅԱ ՊԱՏՐԱՍՏՈՒԿԻ ՄԱԳՆԻՍԱԻՄՊՈՒԼՍԱՅԻՆ ՀԱՏՄԱՆ ԴԵՊՔՈՒՄ

Պլաստիկ հոսունության տեսության հիման վրա ստացված են լարվածա-դեֆորմացիոն վիճակի հավասարումները բարակ թիթեղյա հատվածքի եզրաշերտի տեղայնացված օջախում մագնիսա-իմպուլսային հատման և ծակոտման դեպքում բարակ թիթեղյա պատրաստուկի՝ մատրիցի վրա նետումով:

V.A. ANANYAN

THE STRESS-STRAIN STATE IN THE LOCALIZED CENTER OF DEFORMATION UNDER MAGNETO-IMPULSE CUTTING OF THIN-STEEL BAR

Based on plastic flow theory, equations and design formulas of stress-strain state in the localized center deformation on the cutting edge under magneto-impulse cutting and punching by throwing thin-sheet bars on the matrix are derived.