Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського



Керовані ефекти пластичного деформування заготовок виробів для металургії та транспорту

Драгобецький В.В., Шаповал О. О., Саленко О. Ф., Леготкін Г. І., Слєпинін О. Г., Чигиринський В. В., Кресанов Ю.С., Габелко В. О., Пахолка С. М.

Актуальність роботи

Стрімкий розвиток технологій аерокосмічної галузі, застосування процесів електронно-променевого плавлення та випарювання, створення композиційних матеріалів електронно-променевими методами при виробництві сучасних авіаційних, транспортних, стаціонарних газотурбінних двигунів і установок, а також застосування сучасних плазмових технологій у машинобудуванні, суднобудуванні та військовопромисловому комплексі потребують розробки нових високоефективних виготовлення технологій виробів із металів тугоплавких НОВОГО покоління – прецизійних стрічок, вольфрамових катодів електроннопроменевих гармат, композиційних дротиків і дроту на основі цирконію і гафнію, електродів плазмотронів, керамічних броне матеріалів. На вдосконалення конструкційних є питання сьогодні актуальними матеріалів і високоефективних методів їх оброблення при створенні нових зразків техніки і технічних систем. Прогрес у цій галузі та в наукомістких сферах виробництва стримується не лише відсутністю необхідних матеріалів з потрібним комплексом фізико-механічних властивостей, але й ефективних керованих методів їх обробки.

Мета та очікувані результати

Метою роботи є вирішення науково-технічної проблеми теоретичних основ і наукових положень розробки розвитку оптимізаційних моделей і механізмів ефективного керування формозміни, що процесами пластичної вдосконалюють технологію обробки, калібрування, зміцнення, підвищення пластичності та термічної обробки заготовок та виробів, які структурно-фазові перетворення тугоплавких, регулюють важкодеформівних і композиційних матеріалів із забезпеченням їх розмірної точності, формо-, електро- та тріщиностійкості в умовах високих температур, інтенсивного абразивного зносу та ударних навантажень.

Класифікація керованих ефектів



Постановка загального завдання моделювання процесів обробки тугоплавких важкодеформівних і композиційних металів

Заготовка має ізотропні або анізотропні властивості у напрямку осей деформування та описується поверхнею канонічної форми. Кінцевий деформований стан у процесах деформації

 $\Delta j = \Delta j(y_1, y_2, y_3, \mu_s)$ $\Phi_{\varepsilon} = \int_{(F)} [\varepsilon_p(y_1) - \varepsilon_a(y_i)]^2 dF, \qquad L_{\mathcal{I}} = \int_F (\Delta G_n(x_i) - \Delta G_p(x_i))^2 dF$ $\Phi_{\kappa} = \int_{(F)} [(L/d)_o - (L/d)_a]^2 dF, \qquad L_{\mathcal{E}} = \int_F (E_n(x_i) - E_p(x_i))^2 dF$ $L_{\mathcal{I}} = \int_F (Z_n(x_i) - Z_p(x_i))^2 dF$ $L_{\mathcal{I}} = F[(S(x_i) - D(x_i))^2 dF$

де \mathcal{E}_{p} , \mathcal{E}_{a} – рівномірне і реалі́зоване значення інтенсивності деформації; $(L/d)_{o}, (L/d)_{a}$ – оптимальне і реалізоване значення монокристальності. $\Delta G_{n}(x_{i}), \Delta G_{p}(x_{i})$ – необхідне й реалізоване значення різностінності деталі; $E_{n}(x_{i}), E_{p}(x_{i})$ – необхідне й реалізоване значення логарифмічних швидкостей деформацій; $Z_{n}(x_{i}), Z_{p}(x_{i})$ – необхідне й реалізоване значення пікових значень контактних напруг; $S(x_{i}), D(x_{i})$ – кінцева конфігурація відштампованої деталі деталі, установлені кресленням.

Алгоритм розрахунку процесу деформування



6

Моделювання пружно-пластичного деформування 7 заготовки



Рівняння рівноваги для кожного вузла заготовки

$$\begin{split} \nabla_{\gamma} M^{\beta\alpha}_{mn} - Q^{\beta}_{mn} R^{\beta}_{\gamma mn} + P^{\alpha}_{mn} + T^{\alpha}_{mn} + S^{\alpha}_{mn} &= \overline{\rho} \ddot{X}^{\alpha}_{mn} - \rho \dot{X}^{\alpha}_{mn} c, \\ M^{\beta\alpha}_{mn} R^{mn}_{\beta\alpha} + \nabla_{\beta} Q^{mn}_{\beta} + P^{3}_{mn} + T^{3}_{mn} + S^{3}_{mn} &= \rho \ddot{X}^{3}_{mn} - \rho \dot{X}^{3}_{mn} c, \\ \nabla_{\beta} L^{\alpha\beta} - Q^{\alpha}_{mn} &= 0, \end{split}$$

де ∇_{β} – знак коваріантного диференціювання; M_{mn} – мембранні сили; L – згинальні моменти; Q_{mn}^{β} – перерізальні сили; $\overline{\rho}$ – приведена маса; \ddot{X}_{mn}^{j} – прискорення; P_{mn}^{j} – силова дія імпульсного навантаження; T_{mn} – зусилля тертя в периферійній зоні заготовки; S_{mn} – зусилля гальмівних елементів матриці; P_{mn} – зусилля, що діють на заготовку з боку матриці; R_{mn} – тензор M^{Σ} кривизни; c – швидкість звука в наступній заготовці

Положення вузлів у початковий момент часу

$$\begin{aligned} x_{1,\tau+1}^{i} &= \ddot{x}_{1,\tau+1}^{i} \cdot \varDelta t^{2} + 2x_{1,\tau}^{i} - x_{1,\tau-1}^{i} \\ x_{2,\tau+1}^{i} &= \ddot{x}_{2,\tau+1}^{i} \cdot \varDelta t^{2} + 2x_{2,\tau}^{i} - x_{2,\tau-1}^{i} \end{aligned}$$

Модель розрахунку: а) – дискретне зображення шаруватої та об'ємної заготовки; б) – схема прикладення діючих зусиль; в) – елемент монолітної та шаруватої заготовки, що деформується

B)

де Δt – величина кроку інтеграції за часом; τ – номер кроку за часом



Схема процесу профілювання

Моделювання процесів пресування, спікання та 8 деформування напівфабрикатів і виробів із порошкових матеріалів

Рівняння приросту деформацій термічних компонент

 $\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} = \left(\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} \right)^p - \left(\Delta \varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m} \right)^t$

 $\left(\varDelta \varepsilon^{k,l,m}_{\gamma,\eta,\tau}\right)^{p} = \varDelta \lambda_{\gamma,\eta,\tau} \cdot \sigma^{k,e,m}_{\gamma,\eta,\tau}$

де $\varepsilon_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m}$ – компоненти девіатора деформацій; $\sigma_{\gamma,\eta,\tau}^{k,l,m}$ – компоненти девіатора напружень; $\Delta\lambda_{\chi\eta\tau}$ – міра пластичної деформації; k, l – індекси; γ – номер вузла; η – номер шару; τ – момент часу процесу деформації

Рівняння зв'язку між швидкостями деформацій і напруженнями, кінематичні співвідношення і рівняння нерозривності

$$\sigma_{ik} = \frac{\tau_{s}}{\sqrt{f_{1}^{2}H^{2} + f_{2}^{2}\xi_{\theta}}} \left[f_{1}\xi_{ik} + \left(f_{2} - \frac{1}{3}f_{1}\right)\delta_{ik}\xi_{0} \right]$$

$$\xi_{ik} = 0,5(\dot{\varepsilon}_{i,k} + \dot{\varepsilon}_{k,i})$$

$$\partial\rho / \partial t + \rho_{i,i}\dot{\varepsilon}_{i} / \rho + \xi_{0} = 0,$$

де $\sigma_{i,k} \xi_{ik}$ – тензори напружень і швидкостей деформацій; $\dot{\varepsilon}_i$ – вектор швидкості; $\xi_{\theta} = \xi_i$ – швидкість об'ємних змін; τ_s – опір деформацій матеріалу основи; H – інтенсивність швидкостей деформацій; ρ – відносна густина; f_I , f_2 – функції від ρ , що входять в умову пластичності еліпсоїдного типу Рівняння, що описують процеси термодифузії під час обробки виробів

 $c_1\rho_1T_t - \lambda\Delta T + c_2\rho_2 div(T\vec{v}_P) = w(T, P, t), \quad P \in \Omega, \ t > 0,$ $mC_t - mD\Delta C + div(C\vec{v}_P) = -f(C, P), \quad P \in \Omega, \ t > 0,$

де Т, С- температура та концентрація домішок.

Математична модель процесу спікання, відпалу та електропластичної обробки внутрішніми джерелами тепла

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - vc\rho_n \frac{\partial T}{\partial z} - c\rho_n \frac{\partial T}{\partial t} &= -W(z,t,T), \ (r,z) \in \Omega_t \\ T(r,z,0) &= T_0, \\ \frac{T}{\partial z}\Big|_{z=0} &= f_{12} \Big[\alpha \big(T_c - T \big) - \varepsilon \sigma \big(T_c^4 - T^4 \big) \Big],^{-} \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{z=1} \\ &= f_{12} \Big[\alpha \big(T - T_c \big) - \varepsilon \sigma \big(T^4 - T_c^4 \big) \Big], \\ \frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=0} &= 0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=r_0} \\ &= f_{12} \Big[-\alpha (T) \big(T - T_c \big) - \varepsilon \sigma \big(T^4 - T_c^4 \big) \Big], \end{aligned}$$

W(z,t,T) - джерел тепла

$$W(z,t,T) = f_{11}(z)f_2(T)$$

$$W(z,t,T) = f_{12}(t)f_2(T)$$

$$f_{11}(t) = \left| \sin\left(\frac{t}{t_0}\right) \right|, \quad f_2(T) = \frac{I^2 \rho_0(1)}{\pi^2}$$

Теорія додаткових напружень

9

 $\sigma'_{xcp} = 2 \cdot T_i \cdot \frac{a_k}{1 + a_k} \cdot \frac{(\xi_{cp} - \xi_k)}{H_i},$ $\frac{\partial \Delta \sigma_{\mathbf{x}}}{\partial x} + \frac{\partial \Delta \tau_{\mathbf{xy}}}{\partial y} + \frac{\partial \Delta \tau_{\mathbf{xz}}}{\partial z} = 0,$ $\sigma'_{zcp} = -2 \cdot T_i \cdot \frac{a_k}{1 + a_k} \cdot \frac{(\xi_{cp} - \xi_k)}{H_i},$ $\frac{\partial \Delta \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \Delta \sigma_{y}}{\partial y} + \frac{\partial \Delta \tau_{yz}}{\partial z} = 0,$ $\sigma''_{xcp} = 2 \cdot T_i \cdot \frac{1}{1+a_k} \cdot \frac{(\xi_{cp} - \xi_k)}{H_i},$ $\frac{\partial \Delta \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \Delta \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \Delta \sigma_{z}}{\partial z} = 0.$ $\sigma_{zcp}'' = -2 \cdot T_i \cdot \frac{1}{1+a_k} \cdot \frac{(\xi_{cp} - \xi_k)}{H_i},$ $\tau_{xz} = k_3^{\mp} \cdot Sin(A_3\Phi_3), \ k_3^{\mp} = H_{\sigma 3} \cdot \exp(\theta_3^{\mp})$ $H_{\sigma 3} = [C_{\sigma 3} \cdot (z + C_8) + C_{\sigma 3} \cdot (x + C_{10}) + C_{\sigma 3}]$ $\sigma_{x\partial} = \mp k_3^{\mp} * Cos(A_3 \Phi_3) - \prod_{\sigma_3}^{\mp'} + f(y, z), \ \sigma_{y\partial} = f(x, z),$ $\sigma_{z\partial} = \pm k_3^{\mp} * Cos(A_3\Phi_3) - \prod_{\sigma^3}^{\mp''} + f(x, y)$ $\sigma_{x\partial} = 2 \cdot \frac{T_i}{H_i} \cdot \frac{(\xi_{cp} - \xi_k)}{Cos(A_3 \Phi_{30})} \cdot \exp(\theta_{30} - \theta_3) \cdot Cos(A_3 \Phi_3) + f(y, z),$ $\sigma_{z\partial} = -2 \cdot \frac{T_i}{H_i} \cdot \frac{(\xi_{cp} - \xi_k)}{\cos(A_3 \Phi_{30})} \cdot \exp(\theta_{30} - \theta_3) \cdot \cos(A_3 \Phi_3) + f(x, y),$ $\tau_{xz} = 2 \cdot \frac{T_i}{H_i} \cdot \frac{(\xi_{cp} - \xi_k)}{\cos(A_3 \Phi_{30})} \cdot \exp(\theta_{30} - \theta_3) \cdot \sin(A_3 \Phi_3)$

Профіль обода з хвилеподібною центральною 10 частиною



Робоче креслення профілю 7.0-20-03

Робоче креслення профілю 7.5В-20-03

Робоче креслення профілю 8.0В-20-03

Робоче креслення профілю 8.5В-20-03





Експериментальне дослідження кінематичного 13 впливу на осередок деформації



Ободи коліс, що виробляє ПАТ «Кременчуцький колісний завод»



Зовнішній вигляд тонкостінної продукції для авіадвигунобудування



Експериментальне дослідження пластичної формозміни металу при прокатці тонкостінних профілів



no no 200 210 220 230 240 250 240 270 240 240 0 10 20 30 40

Розташування «свідків» у заготовці







Розташування «свідків» після 1 – 7-го проходів

Технології обробки тугоплавких матеріалів і композиційного дроту на їх основі

Технологічна схема отримання вольфрамових стрічок і катодів

Штабики 10,5x10,5 мм Штабики <u>11,5x14,5 мм</u>

Ротаційне кування (закруглення ребер <u>штабика до діам. 13,5</u> <u>мм</u>) Відпал $t = 2700^{\circ}C, \tau = 5$ мкм

<u>Гвинтова прокатка до діам. 7,8-0,2 мм</u>

Ротаційне кування до діам. 7,3±0,15 мм

Шліфування прутків до діам. 7,0±0,15 м

Контроль якості прутків

Усунення дефектів

Відпал прутків на установці термоциклічної оброки

Відпал прутків на установці термоциклічної оброки

Циклічне безконтейнерне пресування до діам. 4,3 мм

Вібраційне волочіння до діам. 1,7 мм

Плющення стрічки 3х0,6 мм

Розрізання стрічки, виробництво катодів





Зразки вольфрамових стрічок, що отримані при прокатці дроту





Залежність стапельності L/d від критичної деформації є_{ѐð} для дроту діаметром, мкм: 1 – 160; 2 – 154; 3 – 132; 4 – 122; 5 – 116; 6 – 98; 7 – 78; 8 – 74

Косфіцієнт витягування 🔊 ——

Залежність показника монокристальності структури від ступеня деформації та схеми обробки: 1 – волочіння дроту з кованої заготовки діаметром 2,85 мм; 2 – те ж діаметром 1,8 мм

Технології обробки тугоплавких матеріалів і композиційного дроту на їх основі







Мікроструктура композиту діаметром 1,02 мм: а – поперечний розріз, ×30; б – перехідна зона в поперечному розрізі, ×500; в –перехідна зона в подовжньому розрізі, ×500







Мікроструктура композиту діаметром 1,03 мм



Поверхня цирконієвого осердя композиту діаметром: а – 2,5 мм; б – 1,02 мм; в – 1,03 мм, ×1000











Конструкція електродів для плазмового різання







Складові технологічного обладнання виготовлення стрічок із тугоплавких металів

Технології отримання біметалевих виробів



вибухом шаруваті

мідно-алюмінієві композиції

Біметалева обичайка для установок термоядерного синтезу

Зразки біметалевих шин

Титаново-алюмінієво-титанов композиції, отримані зварюванням вибухом

19

Властивості біметалевих виробів, отриманих при оптимальних режимах зварювання

Оптимальні параметри зварювання вибухом композитів з алюмінію, міді і сталі, які відповідають деформаціям поверхневого шару зони з'єднання, рівним граничним значенням рівномірної інтенсивності деформації

Матеріал	Швидкість точки контакту $ u_{\kappa}, $ м/с	Динамічний кут обертання <i>β</i> , °	Параметр зварювання r	Твердість за Вікерсом HV ₁	Твердість за Вікерсом HV ₂	Густина $ ho_1$, г/см 3	Густина $ ho_2$, г/см 3
Алюміній + мідь	1184	11,7	1,0	40	15	8,92	2,7
Мідь + сталь	1884	7,3/15	0,5/1,5	40	150	8,92	7,8



Криві розтягування біметалевих зразків алюміній + мідь з різними режимами відпалу: 1 – зразок без відпалу; 2 – зразок, відпалений при температурі 150 °С протягом 2 годин; 3 – зразок, відпалений при температурі 150 °С протягом 5 годин; 4 – зразок, відпалений при температурі 300 °С протягом 2 годин; 5 – зразок, відпалений при температурі 300 °С протягом 5 годин; 6 – зразок, відпалений при температурі 450 °С протягом години





Морфологія граничного шару мідноалюмінієвого з'єднання з різною температурною обробкою: (а) – після зварювання вибухом;

- (б) 150 °С/2 год;
- (в) 300 °С/2 год,
- (г) 400 °С/2 год

Граничний шар зони з'єднання біметалу алюміній + мідь (виділена область – зона утворення мікротріщин), що пройшов відпал при 450 °С протягом однієї години

20

Властивості біметалевих виробів, отриманих при оптимальних режимах зварювання



Напруження опору зрізу Al/Cu біметалу з різною термообробкою



Зовнішній вигляд мікроскопа РЕМ-106І





21

Мікрофотографії структури міді: а) – вихідна крупнокристалічна структура; б) – структура, отримана при зварюванні вибухом та вальцюванні

> Експериментальні дані зміни границі плинності від температури і часу відпалу

Час відпалу, година	-	2	5	2	5
Температура відпалу, ⁰С	/	150	150	300	300
Границя плинності σ _{0,2} , кгс/мм²	22,14	18,64	16,3	16,5	16,88
Δ σ _{0,2} , κrc/mm²	0/	3,5	5,84	5,64	5,26
	1				

Удосконалена технологія отримання виробів 22 з твердих сплавів

Вибухові контейнери для отримання порошків з твердих сплавів



Чотирикамерний вибухоударний контейнер з компенсацією ударних навантажень Вибухоударний двокамерний роторний контейнер



Трикамерний вибухоударний контейнер у розібраному вигляді

Вибухове зміцнення після первинного спікання

№ пор	Номер зразка	Границя міцності за згинанням, (о _{згин})	Твердість, HRA	Пористість, %	Зневуглецювання	Примітка	Мікроструктура зразка, виготовленого за серійною технологією
1	1	220,2	90	0,02	Не відповідає	2000/01 No. 1. 2.	Мікроструктура
2	1-2	156,8	90	0,02	Не відповідає	зразки № 1; 2; 3 – серійна	зразка після
3	1-3	169,1	90,5	0,02	Не відповідає	технологія	обробки
4	2	248,4	89,5	0,02	Відповідає	Зразки № 2; 2- 1 – обробиз	
5	2-1	204,3	89,5	0,02	Відповідає	вибухом	Зовнішній вигляд
Ви Д 38	імоги ОСТу 82-74	170	88	1-1-	1-1		регенерованих твердих сплавів зі зміцненням

Дослідні зразки







Хемограма деталі, отриманої з твердого сплаву Нанокристалічні об'ємні композитні матеріали: а) латунь-мідь-нержавіюча сталь; б) алюміній-мідь-карбід вольфраму

a)



a)



a)



Локальне легування сталі та міді наночастинками латуні, алюмінію та графіту



б)

Зміцнення зубів ковшів екскаваторів



Зуби ковшів екскаваторів ЭКГ-4У, ЭКГ-63, ЭКГ-10, ЭКГ-8И, 8И, ХЅ 342 RC

Марка сталі	Режим обработки	Границя плинності от, МПа	Границя плинності σв, МПа	Відносне подовження δ, %
A	Загартовування	402	965	55,1
	Холодна прокатка (ε = 30 %)	1106	1458	17,2
Г12Л	Зміцнення вибухом	1060	1435	32,5
113/1	Вибухотермічна обробка	980	1390	52
	Двостадійне зміцнення вибухом	1102	1442	57,2

Послідовність двостадійного вибухового зміцнення партій зубів

IV

m

V

висновки

На основі теоретичних та експериментальних досліджень встановлені ефекти і механізми пластичної деформації, які оказують вплив на напружено-деформований стан обробляючого середовища, структурно-фазові перетворення, що дозволяють керувати процесами формозміни та утворення необхідних фізичних і механічних властивостей.

Розроблені принципи побудови та створено багатофункціональну оптимізаційну модель напружено-деформованого стану для розрахунку технологічних параметрів процесів формозміни, ущільнення, калібрування та плакування з підвищеним ступенем уніфікації відносно різних типів заготовок, деформувальних зусиль і оптимальних деформацій, а також комплексу задач вибору раціональних схем силової та термічної інтенсифікації.

Набула подальшого розвитку оптимізаційна модель розрахунку параметрів навантаження, що забезпечують оптимальний рівень деформацій з використанням чисельного розв'язування скінченно-різницевої форми диференціальних рівнянь імпульсу руху, під час обробки дискретної, суцільної або шаруватої заготовки з урахуванням технологічної спадщини у вигляді сіткової моделі з пружно-пластичними відрізками, що деформуються, які з'єднують вузли з концентрованою масою.

На основі теоретичних положень, що базуються на феноменологічних та системних підходах з урахуванням технологічної спадщини та впливу на властивості тугоплавких матеріалів напружено-деформованого стану в осередку деформації, визначено еволюцію структури та властивостей металу при його інтенсивній термомеханічній обробці.

Виготовлено технічну документацію, затверджено технічні умови на вольфрамові катоди електронних гармат (ТУ 48.0820.403/2-11), біметалеві шини високовольтного обладнання, зміцнення деталей гірничого обладнання, подрібнення утилізованих виробів з твердих сплавів.

висновки

На базі запропонованих моделей та нового аналітичного методу рішення плоскої задачі теорії пластичності, яка ураховує неоднорідність пластичної течії в осередку деформації та її вплив на параметри процесу розроблено комплекс технологій та технологічного обладнання для виготовлення стрічок з тугоплавких металів та композиційного дроту на їх основі, струмопровідних шин високовольтного обладнання та біметалевих труб із шаруватих композиційних матеріалів, складних тонкостінних виробів.

Уперше у світовій практиці розроблено комплекс промислового обладнання для апаратурного оформлення інтенсивних процесів обробки тиском: стани гвинтової прокатки штабиків, устаткування для вібраційного деформування дротиків і дроту машини для волочіння заготовок з електроконтактним нагрівом і волочіння з гідродинамічною подачею мастила до контактних поверхонь осередку деформацій.

Розроблено методики визначення оптимальних параметрів зварювання та зміцнення вибухом, розв'язання прикладних задач розрахунку деформаційних, енергосилових та кінематичних параметрів нових технологій обробки тиском.

На базі ефектів пластичної формозміни впроваджені в виробництво кілька серій високоефективного тонкостінного прокату для коліс вантажних автомобілів, технології виготовлення профілів та коліс з підвищеними якісними характеристиками, які включають зменшення металомісткості виробів, технологію періодичної прокатки заготівок для компресорних лопаток авіадвигунів різного призначення в умовах інтенсивної зсувної деформації.

Згідно зі світовими технічними характеристиками вироби, виготовлені за запропонованими технологіями, відповідають і перевищують зарубіжні аналоги.

Загальний економічний ефект від впровадження технологій виробництва тонкостінного прокату та тугоплавких, важкодеформівних і композиційних матеріалів підтверджено у розмірі 288,32 млн. грн.