

## РАЦІОНАЛЬНИЙ ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ТА СХЕМ ГАРЯЧОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ОТРИМАННІ ПОРОШКОВИХ ТИТАНОВИХ МАТЕРІАЛІВ РІЗНОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Наведено результати досліджень, узагальнення й оптимізації параметрів термомеханічних режимів, обґрунтування вибору способу гарячого штампування пористих заготовок порошкового титану (в закритому штампі та з елементами витікання), а також аналіз впливу схеми напружено-здеформованого стану при отриманні матеріалів і виробів різного призначення з необхідним рівнем щільності, структурою та механічними властивостями, які визначаються умовами експлуатації.

**Ключові слова:** порошкова заготовка, щільність, нагрів, термомеханічний режим, схема деформації, локальна зона деформації, напружено-здеформований стан, структура, механічні властивості.

На сьогодні достатньо широко застосовуються матеріали та виробы на основі порошку титану ПТ5-1, який легують алюмінієм і ванадієм (стоп 2М2А) та отримують традиційним методом: холодне пресування і наступне спікання [1]. Перспективним є використання порошку гідриду титану ( $T_iH_2$ ) із заданим вмістом кисню при отриманні матеріалів спеціального призначення (аналогічних 2М2А) за допомогою цього методу [2].

Отримання порошкових матеріалів з наперед заданими щільністю та механічними властивостями є одним із пріоритетних напрямків розвитку методів порошкової металургії. Тому розроблення, обґрунтування та раціональний вибір параметрів і схем гарячої деформації порошкових заготовок при виробництві матеріалів та виробів різного експлуатаційного призначення є важливою науково-практичною проблемою.

Метою роботи є узагальнення і оптимізація параметрів термомеханічного режиму та обґрунтування вибору раціональних схем гарячої деформації пористих заготовок із порошків титану при отриманні широкого класу матеріалів та виробів різного експлуатаційного призначення.

Для проведення досліджень використано електролітичні порошки титану ПТЕС-1, ПТЕК-1, відсіву титанової губки ТГ-ТВ (-0,63+0,18). Кількість домішок у цих порошках та гарячештампованих виробах не перевищує їх допустимого вмісту в деформованому або литому металі (табл. 1), що створює передумови для отримання широкого класу порошкових матеріалів та виробів різного експлуатаційного призначення із заданими щільністю та механічними властивостями на рівні прокату і вище.

Заготовки (циліндричної форми діаметром  $28 \cdot 10^{-3}$  м із співвідношенням висоти до діаметра

**Таблиця 1** – Хімічний склад порошків, гарячештампованих виробів\* та литого титану

Матеріал	Масова частка домішок, %			
	Fe	N	O	H
ПТЕС-1	0,02	0,010	0,05	0,004
ПТЕК-1	0,04	0,010	0,05	0,003
ТГ-ТВ	0,55	0,110	0,35	0,030
Порошкові вироби:				
ПТЕС-1	0,02	0,035	0,11	0,004
ПТЕК-1	0,04	0,030	0,13	0,003
ТГ-ТВ	0,55	0,160	0,44	0,030
Литий титан [3]:				
деформований стоп				
ВТ1-0	0,30	0,040	0,20	0,010
ливарний стоп				
ВТ1-0	0,30	0,050	0,20	0,015

\* температура штампування 900–950 °С, відпал 800 °С, 3 години, вакуум

$H/D = 1,0$ ) для проведення досліджень виготовляли холодним двостороннім пресуванням. На робочу поверхню матриць та пуансонів прес-форм для холодного пресування і штампів для гарячої деформації наносили мастило – суспензію дисульфіду молібдену ( $MoS_2$ ) з індустріальним маслом у співвідношенні 2:1 та колоїдно-графітовий препарат В-О. Щільність заготовок після холодного пресування, спікання та гарячої деформації визначали гідростатичним зважуванням відповідно до вимог ДОСТ 25281-82.

Значення тиску холодного пресування для отримання порошкових заготовок відносної щільності  $\theta_0 = 70 - 90\%$  знаходяться в широкому діапазоні (табл. 2). Значне збільшення тиску для ТГ-ТВ пояснюється більш низькою пресовуваністю у зв'язку з підвищеною твердістю частинок цього порошку.

**Таблиця 2** – Значення тиску холодного пресування  $p$ , МПа

Матеріал	Відносна щільність заготовок $\theta_0$ , %		
	70	80	90
ПТЕС-1	100	280	640
ПТЕК-1	120	320	730
ТГ-ТВ	280	600	1200

Спікання заготовок при температурі 1100–1200 °С протягом 1–3 години проводили в печі СНВ-1.3/1611 при вакуумі  $(2,6 - 2,9) \cdot 10^{-2}$  Па. Спікання сприяє значному зміцненню контактів між частинками порошку, деякому підвищенню щільності заготовок (табл. 3). При наведених режимах спікання характерно зменшення приросту ущільнення для заготовок меншої пористості без суттєвої зміни розмірів.

**Таблиця 3** – Щільність заготовок після спікання\*  $\theta_{сп}$

Матеріал	Відносна щільність заготовок $\theta_0$ , %		
	70	80	90
ПТЕС-1	72,8	81,4	90,8
ПТЕК-1	72,6	81,3	90,7
ТГ-ТВ	73,9	82,9	92,2

\* температура спікання 1200 °С, витримка 2 години, вакуум

**Таблиця 4** – Тривалість нагріву порошкових заготовок\* у середовищі аргону  $\tau_H$ , хв

Температура нагріву $t_H$ , °С	Відносна щільність заготовок $\theta_0$ , %					
	70	75	80	85	90	100
900	45,5(41,5)	41,3(38,0)	37,0(34,5)	34,5(33,0)	32,0(30,5)	28,5
	49,0(45,0)	45,0(42,0)	41,0(38,5)	39,0(37,0)	36,5(35,0)	33,5
950	41,0(37,5)	39,0(36,0)	36,5(34,5)	35,0(34,0)	34,0(33,0)	32,5
	45,5(42,0)	43,5(41,0)	41,5(39,5)	40,5(39,0)	39,5(38,5)	38,5

\*чисельник – ПТЕС-1, ПТЕК-1; знаменник – ТГ-ТВ; температура спікання 1200 °С, витримка 2 години, вакуум  $2,66 \cdot 10^{-2}$  Па; значення у дужках – неспечена заготовка.

У технології гарячої деформації порошкових заготовок знаходження ефективних засобів захисту від газонасичення та окислення металів у процесі нагріву є одним із важливих завдань при формуванні щільності, структури та властивостей матеріалів. Тривалість нагріву порошкових заготовок до потрібної температури визначали термopарам, як час вирівнювання температури на поверхні та усередині заготовки (табл. 4). Відносно щільності металу  $\theta = 100\%$  отримували електровакуумним переплавленням відповідного порошку.

Тривалість нагріву збільшується для менш щільних заготовок, що пояснюється зменшенням теплопровідності металу зі зростанням пористості та при підвищенні потрібної температури нагріву  $t_H$ . Зменшення тривалості нагріву до більш високих  $t_H$  для заготовок низької щільності ( $\theta_0 \leq 80\%$ ) обумовлене саморозігрівом металу в результаті зниження ефективності аргонного захисту та інтенсивного газонасичення. Деяке збільшення тривалості нагріву заготовок ТГ-ТВ пояснюється зменшенням теплопровідності внаслідок великої кількості домішок у вихідній сировині (табл. 1).

Газонасичення та окислення при нагріві менш щільних заготовок значно зростає, тому що збільшується їх активна поверхня і, відповідно, загальна кількість газів, які поглинаються металом. Заготовки з відносною щільністю  $\theta_0 \leq 75\%$  можливо нагрівати без захисного середовища (на повітрі) тільки до температури 800 °С. При більших значеннях температури газонасичення відбувається так інтенсивно, що надмірне тепло, утворене при ендотермічній реакції окислення, не встигає відводитися зі зразка, відбувається його розігрів та займання. Значення граничних температур  $t_{ep}$ , вище яких неможливо вести нагрів порошкових заготовок (ПТЕС-1, ПТЕК-1, ТГ-ТВ) різної щільності без самозаймання, наведено в табл. 5.

Окислення порошкового титану в процесі нагріву, спікання, гарячої деформації та відпалу оцінювали визначенням глибини газонасиченого шару при вимірюванні мікротвердості від поверхні до центру заготовки. Нагрів порошкових титанових заготовок у середовищі аргону, порівняно з нагрівом на повітрі, збільшення щільності металу, а також зменшення температури та

тривалості витримки дозволяє значно зменшити мікротвердість та глибину газонасиченого шару. При цьому мікротвердість для менш щільних заготовок підвищується не тільки на поверхні, але й у центральних шарах металу (табл. 6). Мікротвердість, найбільша для поверхневого шару заготовки, різко зменшується у глибину і для центральних шарів металу має постійне значення. Використання неспечених порошкових заготовок, порівняно зі спеченими, приводить до підвищення мікротвердості  $H_{\mu}$  на 18–45 %, відповідно для внутрішніх та поверхневих шарів металу.

Глибина газонасиченого шару інтенсивно зростає при зменшенні щільності заготовок, підвищенні температури та тривалості витримки при нагріві (табл. 7).

Газонасиченість по об'єму заготовки, насамперед, залежить від газонасиченості та глибини поверхневого шару, значно зменшується при їх зниженні. Глибину цього шару слід урахувувати при розробленні схеми

подальшої гарячої деформації виробів таким чином, щоб найбільш окислений шар металу більшою мірою, знаходився у припуску на механічну обробку.

Використання аргону як захисного середовища не дозволяє повністю виключити газонасичення при нагріві. Ефективність аргонного захисту забезпечується лише в тому випадку, коли заготовка нагрівається в закритому муфелі при надлишковому тиску газу (~ 0,2 атм) без натікання повітря. В іншому випадку відбувається окислення металу [4].

Інтенсивність ущільнення порошкового металу та тиск гарячої деформації при штампуванні суттєво залежать від вихідної щільності заготовки, температури, швидкості та ступеня деформації на першій та подальших стадіях процесу, наявності змащування. Збільшення ступеня деформації на першій стадії штампування (вільна осадка заготовки у порожнині матриці) позитивно впливає на ущільнення та механічні властивості

**Таблиця 5** – Граничні температури самозаймання порошкових заготовок  $t_{zp}$ , °C

Відносна щільність заготовок $\theta_0$ , %	70	75	80	85	90
$t_{zp}$ , °C	750	850	920	980	1040

**Таблиця 6** – Значення мікротвердості  $H_{\mu}$ , МПа та глибини газонасиченого шару  $h \cdot 10^{-3}$ , м при нагріві спеченого порошкового титану\* протягом 30 хв

Температура нагріву $t_H$ , °C та показники окислення		Відносна щільність заготовки $\theta_0$ , %				
		70	75	80	85	90
800	$H_{\mu}$	$\frac{5800}{6450}$ (3000)	$\frac{5260}{5910}$ (2600)	$\frac{4750}{5400}$ (2250)	$\frac{4470}{5080}$ (1950)	$\frac{4200}{4800}$ (1750)
	$h$	0,86	$\frac{0,54}{0,69}$	$\frac{0,26}{0,40}$	$\frac{0,20}{0,28}$	$\frac{0,16}{0,19}$
850	$H_{\mu}$	$\frac{5380}{7120}$ (3000)	$\frac{5880}{6590}$ (2600)	$\frac{5390}{6060}$ (2250)	$\frac{5080}{5740}$ (1950)	$\frac{4850}{5440}$ (1750)
	$h$	0,97	$\frac{0,66}{0,89}$	$\frac{0,29}{0,50}$	$\frac{0,29}{0,50}$	$\frac{0,21}{0,41}$
900	$H_{\mu}$	$\frac{7000}{7890}$ (3000)	$\frac{6520}{7210}$ (2600)	$\frac{6000}{6700}$ (2250)	$\frac{0,51}{0,80}$	$\frac{5500}{6150}$ (1750)
	$h$	1,10	$\frac{0,80}{1,12}$	$\frac{0,51}{0,80}$	$\frac{0,40}{0,68}$	$\frac{0,27}{0,60}$
950	$H_{\mu}$	$\frac{6880}{7600}$ (2)	$\frac{7330}{8100}$ (2600)	$\frac{6880}{7600}$ (2250)	$\frac{6600}{7330}$ (1950)	$\frac{6380}{7080}$ (1750)
	$h$	1,32	$\frac{1,01}{1,34}$	$\frac{0,72}{1,00}$	$\frac{0,60}{0,89}$	$\frac{0,57}{0,78}$
1000	$H_{\mu}$	$\frac{8900}{9590}$ (3000)	$\frac{8250}{9000}$ (2600)	$\frac{7460}{8130}$ (1950)	$\frac{7460}{8130}$ (1950)	$\frac{7250}{7860}$ (1750)
	$h$	1,54	$\frac{1,24}{1,58}$	$\frac{0,92}{1,24}$	$\frac{0,80}{1,12}$	$\frac{0,67}{1,02}$

\*температура спікання 1200 °C, витримка 2 години, вакуум  $2,66 \cdot 10^{-2}$  Па; середовище нагріву: чисельник – аргон; знаменник – повітря; значення в дужках – центральний шар заготовки.

порошкового металу. Однак деформація не повинна перевищувати технологічної пластичності, що призводить до утворення тріщин на поверхні заготовок [5].

На значення допустимої відносної деформації, яка визначає технологічну пластичність, впливають: вихідна щільність та стан заготовки (спечена, неспечена), вид матеріалу, температура та швидкість деформації (табл. 8).

Використання більш щільних заготовок та застосування операції спікання значно збільшують технологічну пластичність. При підвищенні швидкості деформації в інтервалі  $V = 5 - 15 \text{ c}^{-1}$  (преса К8130, КА2330, К7542) значення допустимої деформації зменшується порівняно незначною мірою. Відносно зменшення пластичності для наведених швидкостей  $(\Delta \epsilon_0 = [(\epsilon_{05} - \epsilon_{015}) / \epsilon_{05}] \cdot 100\%)$  становить 2 та 11%, відповідно для заготовок ПТЕС-1, ПТЕК-1 та ТГ-ТВ. Наявність домішок та пор усередині частинок ТГ-ТВ знижує пластичність такого матеріалу порівняно із ПТЕС-1, ПТЕК-1, для яких цей показник практично однаковий. Використання мастила дозволяє підвищити значення допустимої деформації на 6–8 %. Інтервал температур 900–950 °C є оптимальним, забезпечує максимальну пластичність заготовок різної щільності. При цьому допустимий ступінь деформації  $\epsilon_0$  становить: для спечених заготовок 35–52 % (ПТЕС-1, ПТЕК-1), 25–45% (ТГ-ТВ); для неспечених заготовок 13–20% та 8–15% відповідно. Нижнє значення для заготовок з відносною щільністю 70 %, верхнє – 90 % при швидкості деформації  $10 \text{ c}^{-1}$ .

Для аналізу впливу гарячої деформації на ущільнення, формування структури та механічні властивості порошкового металу використовували метод координатних сіток, які наносили на меридіональний переріз заготовок. Компоненти тензору деформації  $T_{\epsilon}$  та інтенсивність деформацій зсуву  $\Gamma_i$  для кожної пігулки сітки визначали відповідно до методики [6]:

$$\Gamma_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\epsilon_z - \epsilon_r)^2 + (\epsilon_r - \epsilon_{\theta})^2 + (\epsilon_{\theta} - \epsilon_z)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{rz}^2}$$

У зазначеному інтервалі температур (900–950 °C) рівень щільності у об'ємі порошкової заготовки визначається  $\Gamma_i$ , яка для цих металів є величиною постійною і залежить від вихідної щільності заготовки, схеми та ступеня деформації (табл. 9). Як показник деформації при

закритому штампуванні з елементами витікання використовували коефіцієнт витікання  $k_{\text{вум}}$  [5].

При наближенні форми і розмірів заготовки до форми і розмірів гравюри штампа ступінь деформації  $\epsilon_0$  на першій стадії штампування значно менший від технологічної пластичності вихідного матеріалу, що призводить до зменшення  $\Gamma_i$  та заважає досягненню високої щільності виробів. Вплив деформації ( $\epsilon_0$  та  $k_{\text{вум}}$ ) на ущільнення металу та тиск, відповідно, при гарячому закритому штампуванні та з елементами витікання для різної вихідної щільності заготовок наведено в табл. 10. Збільшення деформації призводить до зростання  $\Gamma_i$  та щільності металу. Максимальні значення  $\Gamma_i$  та щільності матеріалу виробів при закритому штампуванні досягаються при умові, якщо деформація заготовок на першій стадії відповідає рівню технологічної пластичності (табл. 8). У процесі закритого гарячого штампування в інтервалі температур 900–950 °C щільність виробів, відповідно, становить 98–98,5 % при мінімальному тиску деформації 800–700 МПа, де нижчі значення відповідають заготовкам меншої вихідної щільності.

При штампуванні з елементами витікання зростання  $\Gamma_i$  та щільності металу забезпечується створенням додаткових локальних зон деформації на кінцевій стадії процесу в застійних зонах виробів, де сконцентрована залишкова пористість [8]. Форму та розміри додаткових локальних зон деформації, залежно від коефіцієнта витікання  $k_{\text{вум}}$ , визначено аналізом викривлення координатної сітки при різних схемах деформації та аналітичним розрахунком [9]. Тиск деформації підвищується при збільшенні  $k_{\text{вум}}$ , однак для досягнення щільності виробів  $\theta \geq 98 \%$  тиск значно менший, ніж при закритому штампуванні. Це обумовлено збільшенням  $\Gamma_i$  при зміні схеми напружено-здеформованого стану від всебічного рівномірного стискання в умовах закритого штампування до всебічного нерівномірного при штампуванні з елементами витікання, що забезпечує отримання практично безпористих виробів ( $\theta = 99,8 - 100 \%$ ) при  $k_{\text{вум}} \geq 9$  та тиску гарячої деформації  $p = 650 - 560 \text{ МПа}$ .

Зменшення швидкості деформації від 15 до  $5 \text{ c}^{-1}$  в інтервалі температур 900–950 °C призводить до знижен-

**Таблиця 8** – Значення допустимого ступеня деформації  $\epsilon_0$  \* залежно від відносної щільності заготовок

Матеріал	$\epsilon_0, \%$				
	$\theta_0, \%$				
	70	75	80	85	90
ПТЕС-1, ПТЕК-1	35/13	41/15	45/17	48/19	52/20
ТГ-ТВ	25/8	32/11	37/13	42/14	45/15

\* чисельник – спечена заготовка; знаменник – неспечена; температура спікання 1200 °C, витримка 2 години, вакуум  $2,66 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ ; температура деформації  $T = 900 - 950 \text{ } ^\circ \text{C}$ ; швидкість деформації  $V = 10 \text{ c}^{-1}$ .

**Таблиця 9** – Значення інтенсивності деформацій зсуву, що забезпечує отримання беспористого металу

Щільність заготовок $\theta_0$ , %	70	75	80	85	90
$\Gamma_i(\theta_0)$	2,93	2,82	2,71	2,59	2,47

ня тиску при закритому штампуванні на 90–70 МПа, при штампуванні з елементами витікання – на 80–65 МПа. Однак при надто малій швидкості заготовки значно охолоджуються, що викликає необхідність підвищення температури нагріву або провадження процесу в ізотермічному режимі. Застосування аргону як середовища нагріву при указаних температурах дозволяє створити достатньо ефективний захист порошкового титану від окислення та газонасичення. Так, при нагріві порошкових заготовок відносної щільності  $\theta_0 = 90; 80; 70$  % до 900 °С в аргоні мікротвердість на поверхні дорівнює 5500; 6000; 7000 МПа, в центральних шарах – 1750; 2250; 3000 МПа, глибина газонасиченого шару становить 0,27; 0,51; 1,10 мм.

Мікротвердість на поверхні заготовки відносної щільності  $\theta_0 = 80$  % при нагріві до температур 800; 900; 1000 °С в середовищі аргону збільшується відповідно до 4750; 6000; 7700 МПа, на повітрі – до 5400; 6700; 8500 МПа при мікротвердості центральних шарів металу 2250 МПа; глибина газонасиченого шару при нагріві в аргоні, відповідно, дорівнює 0,26; 0,51; 0,92 мм, на повітрі – 0,40; 0,80; 1,24 мм. Скорочення від 60 до 10 хвилин вит-

римки при температурі 900 °С в середовищі аргону заготовок відносної щільності 90; 80; 70 % дозволяє зменшити глибину газонасиченого шару з 0,40; 0,73; 1,27 мм до 0,12; 0,30; 0,76 мм.

Позитивний вплив на процес гарячої деформації порошкових заготовок чинить технологічне змащування. Нанесення суспензії дисульфиду молібдену з індустріальним мастилом (2:1) або колоїдно-графітового препарату В-О на робочу поверхню оснастки дозволяє зменшити, порівняно з умовами сухого тертя, тиск деформації на 85–60 МПа (закрите штампування) та 65–50 МПа (штампування з елементами витікання) при температурах 900 та 950 °С відповідно. При подальшому збільшенні температури ефективність використання мастила знижується.

Тиск гарячої деформації при штампуванні визначає щільність порошкових виробів, стійкість та роботоздатність оснастки, енерговитрати та номінальне зусилля ковальсько-пресового обладнання. Штампування з елементами витікання, порівняно із закритим штампуванням, потребує деякого збільшення затрат роботи деформації, однак протікає при менших значеннях тиску та зусилля (табл. 11).

**Таблиця 10** – Залежність ущільнення матеріалу  $\theta$  та тиску  $p$  при гарячому штампуванні заготовок ПТЕС-1, ПТЕК-1 різної відносної щільності  $\theta_0$  від деформації\*

$\frac{\theta, \%}{p, \text{МПа}}$		$\epsilon_0, \% \text{ при закритому штампуванні}$				
		10	20	30	35	40
$\theta_0, \%$	70	$\frac{97,1}{860(810)}$	$\frac{97,6}{830(780)}$	$\frac{97,9}{805(770)}$	$\frac{98,0}{800(760)}$	$\frac{97,9}{805(770)}$
	80	$\frac{97,5}{845(790)}$	$\frac{97,9}{815(765)}$	$\frac{98,0}{795(745)}$	$\frac{98,1}{785(735)}$	$\frac{98,2}{780(730)}$
	90	$\frac{97,8}{830(770)}$	$\frac{98,1}{800(740)}$	$\frac{98,2}{780(725)}$	$\frac{98,3}{765(715)}$	$\frac{98,4}{760(710)}$
$\frac{\theta, \%}{p, \text{МПа}}$		$\epsilon_0, \% \text{ при закритому штампуванні}$				
		45	50	55	60	
$\theta_0, \%$	70	$\frac{97,7}{810(780-)}$				
	80	$\frac{98,3}{775(730)}$	$\frac{98,2}{780(735)}$	$\frac{98,0}{790(740)}$		
	90	$\frac{98,4}{755(705)}$	$\frac{98,5}{750(700)}$	$\frac{98,4}{755(710)}$	$\frac{98,2}{765(720)}$	
$\theta_0, \%$	70–90	$k_{\text{вум}} \text{ при штампуванні з елементами витікання}$				
		7	8	9	10	
		$\frac{98,8}{620-565(580-525)}$	$\frac{99,5}{635-585(610-545)}$	$\frac{99,8-100}{650-600(625-560)}$	$\frac{99,8-100}{670-615(635-575)}$	

\* чисельник – відносна щільність матеріалу; знаменник – тиск штампування при температурі 900° С та 950° С (значення у дужках).

Таблиця 11 – Енергосиловий режим гарячої деформації при штампуванні\*

Відносна щільність заготовки $\theta_0, \%$	Тиск $P, \text{МПа}$	Зусилля $P, \text{кН}$	Робота $A, \text{кН} \cdot \text{м}$
70	$\frac{800}{655}$	$\frac{492}{403}$	$\frac{1,184}{1,353}$
	$\frac{770}{625}$	$\frac{474}{385}$	$\frac{1,194}{1,394}$
90	$\frac{750}{600}$	$\frac{462}{369}$	$\frac{1,210}{1,427}$

\* чисельник – закрите штампування; знаменник – штампування з елементами витікання.

Зусилля штампування зростає, а робота деформації зменшується при штампуванні менш щільних заготовок. Це пояснюється тим, що з ростом щільності заготовок збільшується їх допустимий ступінь деформації на першій стадії процесу та, відповідно, робочий хід повзуна пресу [10].

Формування структури порошкового матеріалу в процесі гарячої деформації визначає рівень механічних властивостей виробів. Залежно від схеми напружено-здеформованого стану та середнього за об'ємом порошкової заготовки значення інтенсивності деформації зсуву  $\Gamma_i$ , при інших рівних умовах, порошковий метал однакової кінцевої щільності (табл. 9) має різний характер викривлення координатної сітки, нанесеної на меридіональний переріз заготовки, та структуру. Збільшення викривлення пігулки сітки, залежно від параметрів деформації, обумовлене зміною компоненти тензора деформацій  $T_\varepsilon$  – деформації зсуву  $\gamma_{rz}$ , що суттєво впливає на формування структури (табл. 12).

При деформації заготовок, наближених за формою до порожнини матриці (максимально реалізується схема напружено-здеформованого стану – всебічне рівномірне стискання), визначений рівень  $\Gamma_i$  і відповідної щільності порошкових матеріалів досягається з малими значеннями  $\gamma_{rz}$ , яка зростає при підвищенні  $\varepsilon_0$  в процесі закритого штампування та  $k_{sum}$  при штампуванні з елементами витікання. Структура матеріалу деформована нерівномірно. Поруч з деформованою, щільною, дрібнозернистою структурою в центральних шарах заготовки, характерна наявність окремих пор та рівновісних крупних зерен у приконтактних зонах затрудненої деформації. Злам зразків переважно міжзеренний, наявні окремі ділянки в'язкого руйнування. На границях зерен скупчення оксидних плівок. Після відпаду частина цих плівок лишається включеннями, частина заміщується порами.

Інтенсивне зростання  $\gamma_{rz}$  при штампуванні з елементами витікання (всебічне нерівномірне стискання) сприяє зменшенню кількості ділянок крихкого міжзеренного зламу у зразках, рівномірному розподілу ок-

сидних плівок по об'єму металу зі збільшенням кількості зон їх розриву та підсиленню дифузії в процесі деформації [11]. При відпалі злам в'язкий усередині зерен; тонкі плівки розчиняються по об'єму металу без порушення його суцільності. Структура металу щільна, деформована, практично однорідна та дрібнозерниста. Наявність окремих дрібних пор характерна для застійних об'ємів затрудненої деформації, де не створено додаткових локальних зон деформації.

Вплив напружено-здеформованого стану, схеми та параметрів термомеханічних режимів, вихідної щільності порошкових заготовок на формування механічних властивостей матеріалу після гарячої деформації та наступного відпалу визначали за результатами випробувань зразків однакового хімічного складу (табл. 13). Показники міцності та пластичності матеріалів, отримані при закритому штампуванні, збільшуються зі зростанням ступеня деформації. Найбільш високі показники досягаються при максимально допустимій деформації на рівні технологічної пластичності, перевищення якої призводить до зниження їх рівня. Штампування з елементами витікання забезпечує отримання матеріалів з більш високими показниками пластичності. При цьому характеристики міцності знаходяться практично на однаковому рівні.

Температура гарячої деформації 900–950 °С несуттєво впливає на механічні властивості матеріалів. Показники пластичності в цьому інтервалі температур мають максимальний рівень. Збільшення температури викликає зменшення пластичних характеристик та зростання границі міцності порошкового титану, що обумовлено підвищеним газонасиченням заготовок та виробів.

Суттєво впливає на механічні властивості матеріалів тип вихідного порошку. Границя міцності виробів із ПТЕС-1, ПТЕК-1 нижче, а показники пластичності вищі, ніж у виробів отриманих із висівок губчастого титану ТГ-ТВ. Це обумовлено підвищеним вмістом домішок у вихідному порошку та výroбах ТГ-ТВ (табл. 1).

Залежно від напружено-здеформованого стану при різних схемах гарячої деформації, рівень пластичних властивостей  $\delta, \psi$  та ударної в'язкості  $KCU$  змінюється в широкому діапазоні (для ПТЕС-1, ПТЕК-1:

Таблиця 12 – Зв'язок параметрів гарячої деформації ( $\epsilon_0, k_{\text{вум}}$ ) порошкового титану вихідної відносної щільності

$\theta_0$  з показниками деформованого стану  $\Gamma_i$  та  $\gamma_{rz}$  \*

		$\frac{\epsilon_0, \%}{k_{\text{вум}}}$	$\frac{10}{7}$	$\frac{20}{7}$	$\frac{30}{8}$	$\frac{35}{8}$	$\frac{40}{9}$	$\frac{45}{9}$	$\frac{50}{10}$	$\frac{52}{10}$	
$\Gamma_i$	$\theta_0, \%$	70	$\frac{1,20}{2,89}$	$\frac{2,00}{2,89}$	$\frac{2,58}{2,92}$	$\frac{2,82}{2,92}$	$\frac{2,94}{2,94}$		$\frac{2,95}{2,95}$		
		80	$\frac{0,95}{2,64}$	$\frac{1,60}{2,64}$	$\frac{1,98}{2,66}$	$\frac{2,24}{2,66}$	$\frac{2,40}{2,68}$	$\frac{2,53}{2,68}$		$\frac{2,69}{2,69}$	
		90	$\frac{0,75}{2,18}$	$\frac{1,10}{2,18}$	$\frac{1,40}{2,21}$	$\frac{1,53}{2,21}$	$\frac{1,65}{2,22}$	$\frac{1,75}{2,23}$	$\frac{1,75}{2,23}$	$\frac{1,80}{2,23}$	$\frac{1,80}{2,23}$
$\gamma_{rz}$	$\theta_0, \%$	70	$\frac{0,21}{0,64}$	$\frac{0,39}{0,64}$	$\frac{0,50}{0,74}$	$\frac{0,55}{0,74}$	$\frac{0,79}{0,79}$		$\frac{0,83}{0,83}$		
		80	$\frac{0,23}{0,72}$	$\frac{0,43}{0,72}$	$\frac{0,55}{0,83}$	$\frac{0,62}{0,90}$	$\frac{0,62}{0,90}$	$\frac{0,65}{0,90}$		$\frac{0,95}{0,95}$	
		90	$\frac{0,25}{0,78}$	$\frac{0,67}{1}$	$\frac{0,60}{0,92}$	$\frac{0,64}{0,92}$	$\frac{0,71}{1,06}$	$\frac{0,69}{1,06}$	$\frac{0,71}{1,06}$	$\frac{0,72}{1,06}$	$\frac{0,72}{1,06}$

\*чисельник – закриті штампування ( $\epsilon_0$ ); знаменник – штампування з елементами витікання ( $k_{\text{вум}}$ ).

$\delta = 18 - 35\%$ ;

$\psi = 27 - 47\%$ ;

$KCU = 380 - 1330$  кДж/м<sup>2</sup>). Всебічне нерівномірне стискання (штампування з елементами витікання –  $\delta = 32 - 35\%$ ;

$\psi = 42 - 47\%$ ;

$KCU = 1200 - 1330$  кДж/м<sup>2</sup>) або сполучення всебічного рівномірного з наступним нерівномірним стисканням (закриті штампування з максимально допустимою деформацією на рівні технологічної пластичності та з елементами витікання –  $\delta = 30 - 35\%$ ;

$\psi = 42 - 46\%$ ;  $KCU = 950 - 1100$  кДж/м<sup>2</sup>), по-

рівняно з рівномірним (закриті штампування неспеченої та спеченої заготовки, відповідно –  $\delta = 22 - 27, 28 - 32\%$ ;

$\psi = 33 - 39, 40 - 45\%$ ;

$KCU = 530 - 690, 750 - 850$  кДж/м<sup>2</sup>), забезпечує отримання більш високого рівня пластичних властивостей порошкового титану при міцності  $\sigma_B = 300 - 440$  МПа.

На основі проведених досліджень розроблена технологія отримання широкого класу порошкових титанових матеріалів та виробів різного експлуатаційного призначення при гарячій деформації заготовок ПТЕС-1, ПТЕК-1, ТГ-ТВ. Враховано вплив напружено-деформованого стану, оптимальних параметрів термомеханічних режимів та різних факторів процесу, при визначених схемах штампування, на ущільнення порошко-

вого металу, формування його структури та механічних властивостей. Технологічні параметри гарячої деформації обмежені границями, що забезпечують отримання титанових матеріалів з найкращим комплексом щільності, властивостей міцності і пластичності, ударної в'язкості на рівні та вищі, ніж у литого здеформованого металу аналогічного хімічного складу, залежно від застосованої схеми гарячої деформації (табл. 14).

Умови експлуатації порошкових виробів потребують забезпечення визначеного рівня щільності та механічних властивостей матеріалу, які залежать від вихідної сировини, від особливостей отримання при різних схемах та параметрах гарячої деформації (табл. 15).

При закритому гарячому штампуванні схема напружено-деформованого стану, на заключній стадії процесу, максимально наближається до всебічного рівномірного стискання. Це дозволяє при використанні порошкових заготовок ТГ-ТВ отримувати конструкційні матеріали та вироби, які, при конкретних умовах експлуатації, задовільняють вимогам високого рівня міцності при умові, що рівень пластичних властивостей не є визначальним. Застосування ПТЕС-1, ПТЕК-1 забезпечує, при високій міцності, підвищення рівня пластичних властивостей матеріалу. Однак для цієї схеми штампування характерна наявність зон затрудненої деформації та залишкової пористості. Ці зони необхідно обов'язково враховувати в процесі проектування та конструювання виробів і технологічного оснащення, щоб ділянки, які формуються в них, не були важконавантаженими загрозованими перерізами виробів.

**Таблиця 13** – Вплив параметрів деформації ( $\varepsilon_0, k_{\text{еум}}$ ) на механічні властивості спеченого порошкового титану ПТЕС-1, ПТЕК-1, ТГ-ТВ відносної вихідної щільності  $\theta_0$  \*

$\frac{\varepsilon_0, \%}{k_{\text{еум}}}$			$\frac{10}{7}$	$\frac{20}{7}$	$\frac{30}{8}$	$\frac{35}{8}$
$\sigma_B$ , МПа	$\theta_0$ , %	70	$\frac{385(430)}{375(425)}$	$\frac{365(400)}{375(400)}$	$\frac{385(430)}{375(425)}$	$\frac{400}{375(425)}$
		80	$\frac{335(290)}{375(400)}$	$\frac{370(385)}{375(400)}$	$\frac{395(445)}{395(440)}$	$\frac{405(460)}{395(440)}$
		90	$\frac{345(300)}{395(430)}$	$\frac{380(365)}{395(430)}$	$\frac{405(415)}{425(455)}$	$\frac{410(430)}{425(455)}$
$\delta$ ,%	$\theta_0$ , %	70	$\frac{19(7)}{27(12)}$	$\frac{23(10)}{27(12)}$	$\frac{26(13)}{30(14)}$	$\frac{28}{30(14)}$
		80	$\frac{23(9)}{29(13)}$	$\frac{26(12)}{29(13)}$	$\frac{27(15)}{32(15)}$	$\frac{28(16)}{32(15)}$
		90	$\frac{25(11)}{30(14)}$	$\frac{27(13)}{30(14)}$	$\frac{28(15)}{33(16)}$	$\frac{29(17)}{33(16)}$
$\psi$ ,%	$\theta_0$ , %	70	$\frac{29(15)}{38(31)}$	$\frac{35(23)}{38(31)}$	$\frac{38(24)}{40(35)}$	$\frac{40}{40(35)}$
		80	$\frac{34(20)}{40(33)}$	$\frac{37(23)}{40(33)}$	$\frac{39(25)}{43(37)}$	$\frac{41(26)}{43(37)}$
		90	$\frac{37(23)}{41(34)}$	$\frac{40(24)}{41(34)}$	$\frac{42(25)}{44(37)}$	$\frac{43(26)}{44(37)}$
$KCU$ , кДж/м <sup>2</sup>	$\theta_0$ , %	70	$\frac{480(70)}{1000(260)}$	$\frac{590(190)}{1000(260)}$	$\frac{710(185)}{1125(320)}$	$\frac{750}{1125(320)}$
		80	$\frac{520(100)}{1060(280)}$	$\frac{640(170)}{1060(280)}$	$\frac{755(220)}{1185(355)}$	$\frac{790(230)}{1185(355)}$
		90	$\frac{570(150)}{1110(315)}$	$\frac{700(200)}{1110(315)}$	$\frac{790(230)}{1230(390)}$	$\frac{815(240)}{1230(390)}$
$\frac{\varepsilon_0, \%}{k_{\text{еум}}}$			$\frac{40}{9}$	$\frac{45}{9}$	$\frac{50}{10}$	$\frac{52}{10}$
$\sigma_B$ , МПа	$\theta_0$ , %	70	$\frac{395}{400(465)}$		$\frac{430(470)}{400(465)}$	
		80	$\frac{415(455)}{425(475)}$	$\frac{420}{425(475)}$	$\frac{415}{440(480)}$	
		90	$\frac{415(455)}{440(480)}$	$\frac{418(465)}{440(480)}$	$\frac{420(460)}{445(485)}$	$\frac{420}{445(485)}$
$\delta$ ,%	$\theta_0$ , %	70	$\frac{27}{32(15)}$		$\frac{32(16)}{32(15)}$	
		80	$\frac{29(15)}{33(16)}$	$\frac{29}{33(16)}$	$\frac{28}{33(17)}$	
		90	$\frac{30(18)}{34(17)}$	$\frac{31(18)}{34(17)}$	$\frac{32(17)}{34(18)}$	$\frac{32}{34(18)}$



$\psi, \%$	$\theta_0, \%$	70	$\frac{39}{41(38)}$		$\frac{42(39)}{44(40)}$	
		80	$\frac{42(25)}{44(39)}$	<u>43</u>	$\frac{42}{44(40)}$	
		90	$\frac{44(27)}{45(39)}$	<u>44(28)</u>	$\frac{45(27)}{45(40)}$	<u>45</u>
$KCU, \text{кДж/м}^2$	$\theta_0, \%$	70	$\frac{740}{1240(370)}$		$\frac{1260(460)}{1300(435)}$	
		80	$\frac{800(225)}{1280(410)}$	<u>800</u>	$\frac{790}{1300(435)}$	
		90	$\frac{840(245)}{1320(440)}$	<u>845(250)</u>	$\frac{850(245)}{1330(395)}$	<u>850</u>

\*температура спікання 1200 °С, витримка 2 години, вакуум  $2,66 \cdot 10^{-2}$  Па; температура деформації 900–950 °С; відпал 800 °С, 3 години, вакуум  $2,66 \cdot 10^{-2}$  Па; чисельник – закрите штампування ( $\epsilon_0$ ); знаменник – штампування з елементами витікання ( $k_{вит}$ ); ТГ-ТВ – значення у дужках.

**Таблиця 14** – Оптимальні технологічні параметри гарячої деформації заготовок порошкового титану та механічні властивості матеріалу

Параметри деформації		Схема деформації	
		Закрите штампування	Штампування з елементами витікання
Відносна щільність заготовки $\theta_0, \%$		70–90	
Температура, °С	Спікання	1200	
	Нагріву	900–950	
	Відпалу	800	
Середовище	Спікання	Вакуум $2,66 \cdot 10^{-2}$ Па	
	Відпалу		
	Нагріву		
Тривалість спікання, відпалу, год.		2-3	
Технологічне змащування		$M_0S_2$ з індустріальним мастилом (2:1), колоїдно-графітовий препарат В-О	
Ступінь деформації $\epsilon_0, \%$ *		$\frac{35-52(13-20)}{25-45(8-15)}$	Коефіцієнт витікання $k_{вит} \geq 9$
Тиск деформації $p, \text{МПа}$		700–800	560–650
Інтенсивність деформацій зсуву $\Gamma_i$		2,84–1,82	$\geq (2,94-2,22)$
Деформація зсуву $\gamma_{rз}$		0,55–0,72	$\geq (0,79-1,01)$
Відносна щільність матеріалу виробів $\theta, \%$		98,0–98,5	99,8–100
Механічні властивості матеріалу виробів**	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\frac{400-420}{430-460} (400-550)$	$\frac{400-430}{460-500}$
	$\delta, \%$	$\frac{28-32}{14-17} (17-20)$	$\frac{32-35}{16-19}$
	$\psi, \%$	$\frac{40-45}{26-29} (32-50)$	$\frac{42-47}{38-41}$
	$KCU, \text{кДж/м}^2$	$\frac{750-850}{180-250} (500-1000)$	$\frac{1200-1300}{370-470}$

\* чисельник – ПТЕС-1, ПТЕК-1; знаменник – ТГ-ТВ; значення у дужках – неспечені заготовки; \*\* значення у дужках – литий здеформований відпалений титан ВТ1-0 [3]

**Таблиця 15** – Характеристика порошкових титанових матеріалів за схемою деформації при виробництві, рівнем щільності та механічних властивостей\*

Схема гарячої деформації		Рівень щільності та механічних властивостей				
		$\theta, \%$	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\Psi, \%$	$KCU, \text{кДж/м}^2$
I Закрите штампування з мінімальною деформацією на першій стадії		97,0–97,5	$\frac{300-330}{270-300}$	$\frac{18-23}{8-12}$	$\frac{27-33}{18-22}$	$\frac{380-490}{80-150}$
Закрите штампування з максимальною деформацією на першій стадії	II Неспечені заготовки	97,5–98,5	$\frac{340-370}{290-330}$	$\frac{22-27}{10-15}$	$\frac{32-39}{20-24}$	$\frac{530-690}{100-170}$
	III Спечені заготовки	98,0–98,5	$\frac{400-420}{430-460}$	$\frac{28-32}{14-17}$	$\frac{40-45}{25-28}$	$\frac{750-850}{180-250}$
IV Штампування з елементами витікання неспечених заготовок		99,5–100	$\frac{400-430}{440-470}$	$\frac{28-33}{14-17}$	$\frac{41-45}{27-32}$	$\frac{820-930}{210-300}$
V II та наступне штампування з елементами витікання		99,8–100	$\frac{400-440}{450-500}$	$\frac{30-33}{16-19}$	$\frac{42-46}{30-35}$	$\frac{950-1100}{320-430}$
VI Штампування з елементами витікання спечених заготовок		99,8–100	$\frac{400-430}{460-500}$	$\frac{32-35}{17-19}$	$\frac{42-47}{38-41}$	$\frac{1200-1330}{400-470}$

\* чисельник – ПТЕС-1, ПТЕК-1; знаменник – ТГ-ТВ.

При штампуванні з елементами витікання, за рахунок застосування компенсаційних щілин, в периферійних порожнинах затрудненої деформації, а також у ділянках, де формуються загрозові перерізи виробів, створюються додаткові локальні зони деформації, умови всебічного нерівномірного стиснення та пластичного стікання металу на заключній стадії процесу. Рівень щільності та механічних властивостей матеріалу виробів ПТЕС-1, ПТЕК-1 повністю задовільняє вимоги до аналогічних деталей з литого здеформованого металу. Позитивний вплив на пластичні властивості отримуваних матеріалів, особливо ударну в'язкість, значення якої перевищує рівень для литого здеформованого металу, надає скорочення кількості технологічних операцій у процесі переділу порошкових заготовок, при яких відбувається газонасичення та окислення металу.

Закрите гаряче штампування литих матеріалів передбачає використання компенсаційних щілин для запобігання перевантаженню та поломки штампової оснастки внаслідок коливання об'єму литої заготовки. При штампуванні порошкових заготовок з елементами витікання компенсаційні щілини застосовуються з метою керування процесом ущільнення, формування структури та механічних властивостей матеріалу в периферійних застоїних порожнинах матриці, де деформація ускладнена, за рахунок створення локальних зон деформації. Це визначає кількість та місце розташування компенсаційних щілин. Для формування локальних зон деформації та необхідного рівня інтенсивності деформації зсуву достатньо процес здійснювати до початку усталеного витікання металу в компенсаційні щілини з мінімальними припусками.

Враховуючи вимоги до рівня щільності та механічних властивостей матеріалу, що визначаються при експлуатації виробів, застосовуючи конкретні умови гарячої деформації при реалізації різних схем напружено-здеформованого стану (від всебічного рівномірного стиснення – закритого штампування до всебічного нерівномірного – штампування з елементами витікання) можна зменшити собівартість виробництва, підвищити продуктивність процесу та коефіцієнт використання металу, забезпечити, при визначених термомеханічних та енергосилових параметрах, отримання широкого класу порошкових титанових матеріалів і виробів різного експлуатаційного призначення з необхідними щільністю, структурою та механічними властивостями.

плуатації виробів, застосовуючи конкретні умови гарячої деформації при реалізації різних схем напружено-здеформованого стану (від всебічного рівномірного стиснення – закритого штампування до всебічного нерівномірного – штампування з елементами витікання) можна зменшити собівартість виробництва, підвищити продуктивність процесу та коефіцієнт використання металу, забезпечити, при визначених термомеханічних та енергосилових параметрах, отримання широкого класу порошкових титанових матеріалів і виробів різного експлуатаційного призначення з необхідними щільністю, структурою та механічними властивостями.

#### Список літератури

1. Быков И. О. Исследование влияния режима спекания на свойства порошкового материала 2М2А / Быков И. О., Овчинников А. В. // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. трудов. Вып. 4 8, ч. 3. – Днепропетровск, ПГАСА, 2009. – 260 с.
2. Применение гидрированного титана с заданным содержанием кислорода для получения изделий методом порошковой металлургии / [И. О. Быков, А. В. Овчинников, С. И. Давыдов и др.] // Теория и практика металлургии. – 2011. – № 1–2. – С. 65–69.
3. Применение титана в народном хозяйстве / Под ред. А. Т. Гуманова – К. : Техника, 1975. – 200 с.
4. Колачев Б. А. Механические свойства титана и его сплавов / Колачев Б. А., Ливанов В. А., Буханова А. А. – М. : Металлургия, 1974. – 544 с.
5. Изменение деформационных характеристик пористых заготовок из порошков титана, меди и алюминия / [В. А. Павлов, М. И. Носенко, Б. В. Попов и др.] // Порошковая металлургия. – 1987. – № 9. – С. 20–24.
6. Павлов В. А. Исследование горячей деформации и уплотнения порошковых металлов / Павлов В. А., Носенко М. И. // Порошковая металлургия. – 1988. – № 1. – С. 1–6.

7. Павлов В. А. Влияние горячей деформации на формирование структуры и свойств порошковых металлов / Павлов В. А., Носенко М. И. // Порошковая металлургия. – 1988. – № 2. – С. 16–20.
8. Павлов В. А. Влияние деформированного состояния на уплотнение порошковых металлов при горячей штамповке / Павлов В. А., Носенко М. И. // Порошковая металлургия. – 1992. – № 2. – С. 8–12.
9. Носенко М. И. Дослідження гарячого штампування порошкових заготовок / Носенко М. И. Павлов В. О. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2006. – № 2. – С. 51–55.
10. Носенко М. И. Экспериментально-аналитический расчет силового режима и анализ энергозатрат горячей штамповки порошковых заготовок / Носенко М. И., Павлов В. А., Ляшенко А. П. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 1999. – № 2. – С. 69–72.
11. Носенко М. И. Формування структури порошкових конструкційних титанових матеріалів при гарячому штампуванні // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні / Носенко М. И., Павлов В. О., Ляшенко А. П. – 2008. – № 2. – С. 14–16.

Одержано 09.11.2015

**Носенко М.И. Рациональный выбор параметров и схем горячей деформации при получении порошковых титановых материалов различного эксплуатационного назначения**

*Приведены результаты исследований, обобщения и оптимизации параметров термомеханических режимов, обоснование выбора способа горячей штамповки пористых заготовок порошкового титана (в закрытом штампе и с элементами истечения), а также анализ влияния схемы напряженно-деформированного состояния при получении материалов и изделий различного назначения с требуемыми уровнем плотности, структурой и механическими свойствами, которые определяются условиями эксплуатации.*

**Ключевые слова:** порошковая заготовка, плотность, нагрев, термомеханический режим, схема деформации, локальная зона деформации, напряженно-деформированное состояние, структура, механические свойства.

**Nosenko M. Rational choice of options and hot deformation schemes in the preparation of titanium powder materials of different operational purposes**

*The results of research, synthesis and optimization of parameters of the thermomechanical regimes rationale for the selection method of hot forming porous preforms powdered titanium (in the closed die, and with elements of expiration), and an analysis of the impact of the scheme of the stress-strain state in the preparation of materials and products for various purposes with the required level of density, structure and mechanical properties, which are determined by operating conditions.*

**Key words:** powder preparation, density, heat, thermomechanical mode of deformation scheme, local deformation zone, the stress-strain state, structure, mechanical properties are presented.