

УДК 669.295:620.179

Канд. техн. наук Т. О. Коваленко<sup>1</sup>, д-р техн. наук В. Ю. Ольшанецький<sup>2</sup>, О. А. Джуган<sup>2</sup><sup>1</sup> АТ «Мотор-Січ», <sup>2</sup> Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВАРІАЦІЙ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГОВАНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ПІСЛЯ ГВИНТОВОЇ ЕКСТРУЗІЇ

*Розроблено технологічну схему та визначені основні режими процесу деформації, що забезпечують формування субмікрокристалічної структури в дослідних сплавах. Досліджено вплив вмісту легувальних елементів на структуру та механічні властивості титанових сплавів, що піддаються інтенсивній пластичній деформації, а також отримано відповідні аналітичні залежності для корегування хімічного складу.*

**Ключові слова:** структура, механічні властивості, легувальні елементи, інтенсивна пластична деформація, титан, дослідні сплави, аналітичні рівняння.

На сьогодні спостерігається стійка тенденція щодо збільшення обсягу споживання титану на світовому ринку. При цьому частка використання титанових сплавів у авіадвигунобудуванні досягає 60 % і надалі прогнозується збільшення цього показника [1]. В умовах збільшення навантажень на відповідальні деталі сучасних авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) до механічних властивостей титанових сплавів пред'являються все більш високі вимоги [2]. Аналіз сучасних наукових публікацій показав, що перспективним у цьому напрямку є формування субмікрокристалічної (СМК) структури методами інтенсивної пластичної деформації (ІПД) [3, 4]. Вважається, що найбільш ефективним методом такої деформаційної обробки є гвинтова екструзія (ГЕ) [5]. У той же час, на сьогодні недостатньо інформації щодо впливу хімічного складу сплавів на процес такого роду деформації.

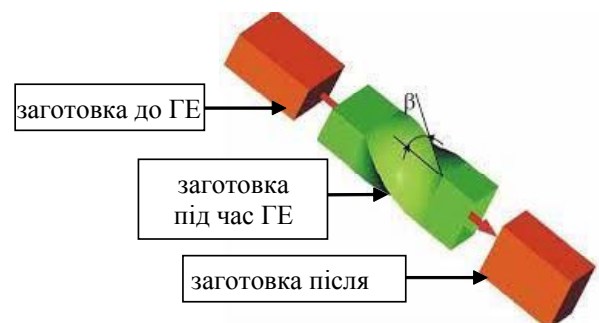
Отже, основним завданням, поставленим у роботі, було отримання титанових сплавів з різним хімічним складом з їх подальшим деформуванням для забезпечення СМК структури та встановлення відповідних залежностей між рівнем механічних властивостей та вмістом легувальних елементів у матеріалі.

Субмікрокристалічну структуру в дослідних титанових сплавах, виплавлених відповідно до матриці планування (табл. 3), отримували за технологією інтенсивної пластичної деформації методом гвинтової екструзії (ГЕ).

Суть ГЕ полягала в продавлюванні призматичної заготовки крізь матрицю з гвинтовим каналом. Кут  $\beta$  нахилу гвинтової лінії до осі екструзії змінювався по висоті матриці, причому на її початковій і кінцевій ділянках він дорівнював нулю (рис. 1).

Особливості геометрії каналу матриці забезпечували збереження при продавлюванні ідентичності початкової та кінцевої форм і розмірів оброблюваної заготовки, що дозволило здійснювати її багаторазову екструзію з метою накопичення великих величин деформації [6].

Інтенсивну пластичну деформацію ( $\alpha + \beta$ ) – сплавів проводили при температурах на 100...150 °С нижче від температури ( $\alpha \leftrightarrow \beta$ )- перетворення, що дозволяло виключити перегрів і протікання рекристалізаційних процесів, пов'язаних з укрупненням структурних складових. При більш низьких температурах (350...450 °С) в процесі гвинтової екструзії заготовки зруйнувалися, що обумовлено, мабуть, недостатньою технологічною пластичністю сплаву.



**Рис. 1.** Схема деформування заготовки в процесі ІПД методом ГЕ

Технологічні параметри ІПД методом ГЕ титанових заготовок представлені в табл. 1.

Зовнішній вигляд заготовок до та після процесу гвинтової екструзії наведено на рисунку 2, мікроструктуру сплавів після ГЕ наведено на рисунках 3 і 4.

З метою встановлення можливості зниження вмісту коштовних легувальних елементів і забезпечення механічних властивостей на рівні вимог до сплаву стандартного складу в жароміцних титанових сплавах типу ВТ8, що мають субмікрокристалічну структуру, проводили дослідження впливу варіацій хімічного складу на властивості сплавів, додатково зміцнених при ІПД.

**Таблиця 1** – Технологічні параметри процесу гвинтової екструзії титанових заготовок

Сплави	Розміри заготовки, мм	Температура нагрівання заготовки, °C	Тиск пресування, МПа	Протидіючий тиск, МПа	Кут нахилу каналу матриці $\beta$ , град.
Типу BT8	25×40×65	770	2390	130	45

Як базовий обраний сплав марки BT8, що широко застосовується для виготовлення робочих лопаток компресора, стяжних болтів, важелів і кронштейнів. Зазначені деталі, як правило, мають розміри, приблизно схожі або менші за розміри заготовок, отриманих методом ГЕ, що дозволяє розглядати їх як перспективні деталі для апробації розробок за результатами проведених досліджень.

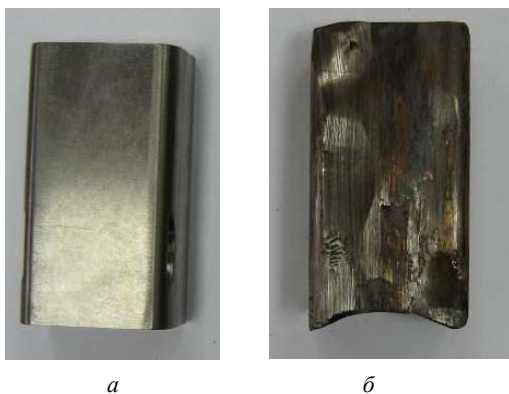
Для реалізації поставлених завдань з дослідження впливу вмісту легувальних елементів на структуру і властивості субмікросталічних титанових сплавів проводили серію активних експериментів за допомогою методу математичного лінійного планування. Для проведення активних експериментів необхідно було провести серію дослідних плавів з різним хімічним складом, а також реалізувати гвинтову екструзію виплавлених сплавів.

Для скорочення кількості дослідних плавів використовували метод планування експерименту, що дозволяє описати кількісну зміну впливу основних легувальних елементів сплаву (Al, Mo, Zr) на рівень механічних властивостей.

Планування ортогонального експерименту проводили для трьох незалежних змінних на двох рівнях варіювання досліджуваної системи легування. Межі рівнів варіювання і крок варіювання вибрані на підставі аналізу структури, механічних властивостей, а також аналізу умов експлуатації високонавантажених деталей титанових сплавів.

На підставі вищенаведених даних у роботі був реалізований ортогональний план експериментів  $2^3$  (табл. 2).

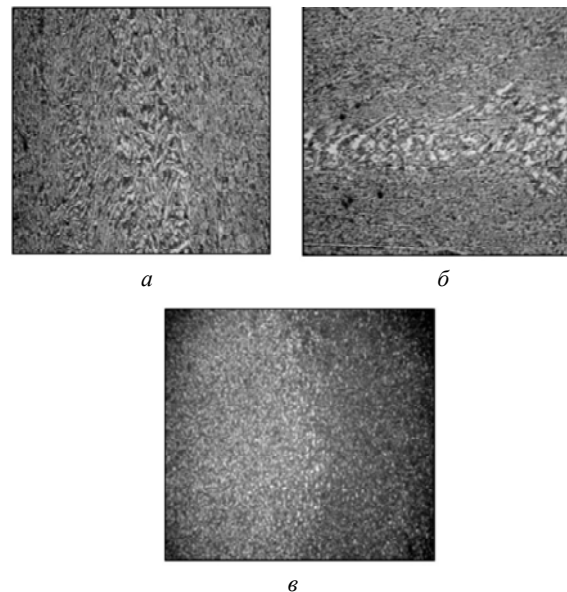
Як незалежні змінні виступали: вміст алюмінію, молібдену і цирконію. Спільний вплив цих елементів враховували в регресійних рівняннях.



**Рис. 2.** Зовнішній вигляд заготовки:

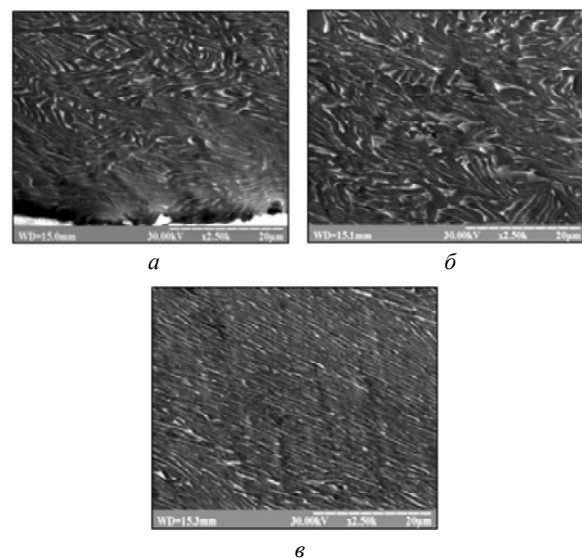
*a* – до процесу гвинтової екструзії; *б* – після процесу гвинтової екструзії

Матриця планування експерименту дозволила отримати квадратичну математичну модель при переході до натурального масштабу (див про це далі). Матриця планування експерименту в кодованому масштабі показана в табл. 3.



**Рис. 3.** Зміна мікроструктури сплаву після гвинтової екструзії (поперечний переріз),  $\times 500$ :

*a* – 1 проход; *б* – 4 проходи; *в* – 7 проходів



**Рис. 4.** Зміна мікроструктури сплаву після гвинтової екструзії (поздовжній переріз): *a* – 2 проходи; *б* – 5

проходи; *в* – 7 проходів

Таблиця 2 – Кодування факторів ортогонального центрального плану експериментів 2<sup>3</sup>

Інтервал варіювання рівень факторів	X <sub>1</sub> (Al, %)	X <sub>2</sub> (Mo, %)	X <sub>3</sub> (Zr, %)
	X <sub>Sn</sub> = 1,5 % = const, X <sub>Si</sub> = 0,22 % = const		
Верхній рівень (+)	5,8	4,3	1,50
Нульовий рівень (0)	4,9	2,9	0,75
Нижній рівень (-)	4,0	1,5	0
Інтервал варіювання, Δ	0,9	1,4	0,75

Таблиця 3 – Ортогональний центральний план експериментів 2<sup>3</sup>

№	X <sub>1</sub> (Al, %)	X <sub>2</sub> (Mo, %)	X <sub>3</sub> (Zr, %)	X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub> (Al*Mo, %)	X <sub>1</sub> *X <sub>3</sub> (Al*Zr, %)	X <sub>2</sub> *X <sub>3</sub> (Mo*Zr, %)
1	-	-	-	+	+	+
2	+	-	-	-	-	+
3	-	+	-	-	+	-
4	+	+	-	+	-	-
5	-	-	+	+	-	-
6	+	-	+	-	+	-
7	-	+	+	-	-	+
8	+	+	+	+	+	+

Як функції відгуку прийняті границя міцності ( $\sigma_e$ ) та відносне видовження ( $\delta$ ). Результати механічних випробувань (середні значення) представлені в табл. 4.

За даними випробувань механічних властивостей розраховували коефіцієнти лінійних регресії, які у кодовому масштабі дозволили отримати наведені нижче залежності механічних властивостей від процентного вмісту елементів, варійованих у заданих границях (див. табл. 2).

Таблиця 4 – Механічні властивості титанових сплавів

Кількість дослідів (N <sub>i</sub> )	Функція відгуку – механічні властивості сплавів	
	Після ПД (СМК структура)	
	$\sigma_e$ , Мпа	$\delta$ , %
1	1027	18
2	1100	15
3	1148	16
4	1318	7
5	1052	19
6	1190	14
7	1190	14
8	1220	7

Далі, за загальною формулою (1) визначили коефіцієнти множинної кореляції  $R$  [7] без урахування і з урахуванням трьох можливих парних взаємодій для пластичності ( $\delta$ ) та границі міцності ( $\sigma_e$ ):

$$R = \sqrt{\frac{n \cdot (b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + \dots + b_j^2)}{\sum_i y_i^2 - n \cdot \bar{y}^2}}; \quad i = \overline{1,8}, \quad j = \overline{1,6}. \quad (1)$$

При цьому самі коефіцієнти  $b_j$  визначали за формулами:

$$\bar{y} = b_0 = \frac{\sum_i y_i}{n}, \quad b_1 = \frac{\sum_i y_i \cdot x_{1i}}{n},$$

$$b_2 = \frac{\sum_i y_i \cdot x_{2i}}{n}, \quad b_3 = \frac{\sum_i y_i \cdot x_{3i}}{n} \dots$$

Перевірка коефіцієнта множинної кореляції  $R$  за допомогою коефіцієнта лінійної кореляції  $r_{y_e/y_p}$  ( $y_e$  – експериментальні значення пластичності та границі міцності,  $y_p$  – розрахункові значення) без урахування парних ефектів та з урахуванням найкращих парних ефектів за формулою:

$$r_{y_e/y_p} = \frac{\sum_i y_{ei} \cdot y_{pi} - n \cdot \bar{y}_e \cdot \bar{y}_p}{\sqrt{\left(\sum_i y_{ei}^2 - n \cdot \bar{y}_e^2\right) \cdot \left(\sum_i y_{pi}^2 - n \cdot \bar{y}_p^2\right)}} \quad (2)$$

згідно з поліномом

$$y_{pi} = b_0 + b_1 \cdot x_{1i} + b_2 \cdot x_{2i} + b_3 \cdot x_{3i} + b_{ju} \cdot (x_j x_u)_i, \quad j \neq u \quad (3)$$

дала такі ж результати.

Далі визначили похибки середньоквадратичних значень ( $\Delta b$ ) за формулою:

$$(\Delta b_j) = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y)_i^2}{n * (1+k)}}$$

де  $k$  – кількість факторів впливу.

Нижче наведені рівняння залежності пластичності та границі міцності від вмісту легувальних елементів з урахуванням впливу найбільш значущих парних ефектів у натуральному масштабі:

$$\delta, \% = 24,5712 - 1,0316\%Al + 1,9248\%Mo - 0,3333\%Zr - 0,7937\%Al\%Mo$$

при

$$R = 0,9913 ;$$

$$(\Delta b) = \pm 0,2795 ;$$

$$\sigma_s, \text{МПа} = 692,9882 + 57,0833\%Al + 60,5357\%Mo + 68,8689\%Zr - 20,3571\%Mo \%Zr$$

при

$$R = 0,9517 ;$$

$$(\Delta b) = \pm 17,3444 .$$

Таким чином, на підставі дії трьох факторів впливу отримані рівняння в натуральному масштабі з урахуванням належних парних взаємодій. Крім цього, було знайдено середньоквадратичну похибку коефіцієнтів цих рівнянь, яка підтверджує рототабельність дисперсії дослідів. Отже, отримана нами гіперплощина цільової функції достатньо точно характеризує вплив концентраційних факторів, що дозволяє ефективно скористати-

ся цими рівняннями для корегування процентних кількостей зазначених вище хімічних елементів, а саме: алюмінію, молібдену та цирконію. Ця обставина дала можливість знайти найкращий хімічний склад дослідного сплаву з урахуванням усіх вимог, які ставлять технологи та конструктори до сплавів типу ВТ8 при їх застосуванні в умовах виробництва деталей для авіаційних газотурбінних двигунів.

Корисно акцентувати, що дослідження впливу вмісту легувальних елементів на структуру і механічні властивості субмікрокристалічних сплавів системи Ti-Al-Mo-Zr-Si-Sn (типу ВТ8) зроблено вперше.

#### Список літератури

1. Ильин А. А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшин И. С. – М. : ВИЛС – МАТИ. 2009. – 520 с.
2. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М. : ИКЦ «Академкнига». 2007. – 398 с.
3. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / Гусев А.И. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 416 с.
4. Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидроэкструзии / [Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин, С. Г. Сынков и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 1999. – № 3 (Т. 9). – С. 109–111.
5. Влияние интенсивной пластической деформации на критическую температуру  $A_{c3}$  титанового сплава ВТ8 / [Т. А. Коваленко, И. А. Овчинникова, О. С. Омельченко и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Дн-вск, 2011. – Вып. 58. – С.407–412.
6. Коваленко Т. А. Формирование стабильной субмикрористаллической структуры в титане / Т. А. Коваленко, А. В. Овчинников // МиТОМ. – 2010. – № 2. – С. 35–43.
7. Ольшанецкий В. Е. О физических подходах к математическому моделированию функциональных связей / В. Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2003. – № 1. – С. 80–86.

Одержано 29.09.2014

#### Коваленко Т.А., Ольшанецкий В.Е., Джуган А.А. Исследование влияния вариаций химического состава на структуру и свойства легированных титановых сплавов после винтовой экструзии

*Разработана технологическая схема и определены основные режимы процесса деформации, обеспечивающие формирование субмикрористаллической структуры в опытных сплавах. Исследовано влияние содержания легирующих элементов на структуру и механические свойства титановых сплавов, подвергающихся интенсивной пластической деформации, а также получены соответствующие аналитические зависимости для корректировки химического состава.*

**Ключевые слова:** структура, механические свойства, легирующие элементы, интенсивная пластическая деформация, титан, опытные сплавы, аналитические уравнения.

#### Kovalenko T., Olshanskiy V., Dzhugan O. Study of the influence of the variations in chemical composition on the structure and properties of doped titanium alloys after twist extrusion

*The technological scheme and the main modes of the deformation process, providing formation of SMC structure of experimental alloys were developed. The influence of the content of alloying elements on the structure and mechanical properties of doped titanium alloys subjected to intensive plastic deformation was studied, as well as the relevant analytical dependence for the correction of the chemical composition was obtained.*

**Key words:** structure, mechanical properties, alloying elements, severe plastic deformation, titanium, experimental alloy, analytical equations.