

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.01

УДК 669.295:669.046.516

О.Б.Галенкова, В.С.Єфанов, О.В.Завгородній, В.І.Бронецька, В.Г.Шевченко

КОМПЛЕКСНИЙ ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ γ-СПЛАВУ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ

Анотація. *Методом планування повнофакторного експерименту досліджено вплив модифікуючих елементів Y, Re та B на властивості сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo. Отримано регресійні рівняння, що дають можливість розрахувати хімічний склад сплаву у відповідності до заданого рівня властивостей матеріалу авіаційного виробу.*

Ключові слова: *алюмінід титану, повнофакторний експеримент, модифікуючі елементи, регресійні рівняння, параметри оптимізації, функція відгуку, механічні властивості.*

Постановка проблеми.

Сплави на основі алюмініду титану завдяки високим питомим характеристикам міцності, жароміцності та жаростійкості на сьогоднішній день є найбільш перспективним класом матеріалів для виготовлення деталей сучасних авіаційних двигунів, зокрема, лопаток турбіни, робоча температура яких знаходиться в діапазоні 700...900°C, і заміни жароміцних сплавів на основі нікелю, що володіють значно більшою щільністю.

Головною технологією отримання деталей з алюмініду титану є технологія лиття [1-3], завдяки якій формується крупнозеренна структура, що поступається за властивостями матеріалам, що отримані, зокрема, шляхом деформації [4].

Одним із шляхів подрібнення зерна литої структури для підвищення рівня механічних властивостей γ-сплавів є модифікування поверхнево активними елементами, що адсорбуються на поверхні зерен та сприяють зміні поверхневої активності кристалів швидкості дифузії і призводить до зміни форми та розмірів кристалів [5]. Згідно принципів комплексного легування доцільним є застосування сумісного легування модифікуючими елементами.

При вивченні сумісного впливу модифікаторів на властивості сплаву на основі алюмініду для зменшення кількості експериментів використовують методи планування експерименту. Планування експерименту дозволяє варіювати одночасно усі фактори і отримувати кількісні оцінки основних ефектів взаємодії [6].

На сьогоднішній день найбільша кількість досліджень по вивченню впливу параметрів і типу структури на механічні властивості здійснюється стосовно сплавів алюмініду титану четвертого покоління [7-9]. Тому в якості сплаву для досліджень обрано сплав четвертого покоління типу TNM (Titanium-Niobium-Molybdenum) системи Ti-28Al-7Nb-2Mo. На основі аналізу впливу різних модифікуючих елементів на структуру та властивості γ -сплавів елементами-модифікаторами обрано В, У та Re.

Мета роботи – забезпечення рівня властивостей в γ -сплавах за рахунок оптимального вмісту модифікуючих елементів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для визначення індивідуального та комплексного впливу обраних модифікаторів дослідження проводили у відповідності з методом планування повнофакторного експерименту 2^3 .

Інтервали варіювання модифікаторів обирали наступним чином. Для визначення індивідуального впливу модифікаторів їх нижній рівень приймали рівним нулю. Верхній рівень вмісту модифікаторів обирали виходячи з фізичних та хімічних особливостей властивостей кожного з елементів.

Беручи до уваги дані літературних джерел максимальний вміст модифікуючих елементів приймали на рівні 0,2% кожен [10-12].

З метою визначення впливу концентрацій модифікуючих елементів на структуру та властивості проводили дослідження впливу У, Re, В у складі дослідного сплаву системи Ti-28Al-7Nb-2Mo. Дослідження реалізовували за матрицею планування експерименту.

В якості факторів (незалежних змінних) при виборі хімічного складу експериментального сплаву використовували відсотковий вміст модифікуючих елементів:

$$X_1 - \text{У, \%}; X_2 - \text{Re, \%}; X_3 - \text{В, \%}.$$

Сумісний вплив даних елементів враховували в регресійних рівняннях. Роботу проводили з використанням методу математичного планування експерименту при припущенні лінійної залежності механічних властивостей від хімічного складу.

В якості функції відгуку обрані механічні властивості матеріалу: границя міцності σ_B і пластичність δ , що обумовлюють технологічні властивості та визначають можливість використання сплаву для виробів авіаційного призначення.

На підставі приведених даних в роботі реалізовано ортогональний повнофакторний експеримент 2^3 (таблиця 1).

Таблиця 1

Кодування факторів ортогонального центрального плану експерименту 2^3

Інтервали варіювання та рівні факторів	Фактори, що вивчаються		
	$X_1(Y), \%$	$X_2(Re), \%$	$X_3(B), \%$
Нульовий рівень: $X=0$	0,1	0,1	0,1
Інтервал варіювання, Δ	0,1	0,1	0,1
Верхній рівень: $X=+1$	0,2	0,2	0,2
Нижній рівень: $X=-1$	0	0	0

Матриця планування експерименту в кодовому масштабі показана в таблиці 2. Параметрами оптимізації є механічні властивості експериментального сплаву. Для виключення помилки експерименту кожен дослід на заданому рівні повторювали три рази. Результати дублюючих дослідів усереднювали.

Для реалізації розробленого плану експерименту необхідно отримати 8 складів сплаву за основним планом і 1 склад в центрі плану. Необхідно провести 9 плавок з трьома повторами по кожному зі складів. Для цього виплавляли по три злитка кожного сплаву.

Беручи до уваги великі об'єми плавок, не менше 27, роботу проводили з використанням лабораторної установки вакуумно-дугового переплаву, що

забезпечує виплавку невеликого об'єму металу в достатній кількості. Отримані злитки експериментальних складів діаметром Ø90мм та висотою 15мм є достатнім об'ємом металу для відбору проб для визначення хімічного аналізу, виготовлення зразків для механічних випробувань, аналізу макро- та мікроструктури матеріалу.

Таблиця 2

Ортогональний центральний план експериментів 2³

№ досліду	X ₁	X ₂	X ₃
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	-
4	-	-	-
5	-	-	+
6	-	+	+
7	+	-	+
8	-	+	-
9	0	0	0

Для визначення впливу мікродобавок Y, Re та B на рівень механічних характеристик сплавів експериментальних складів виготовлені зразки в поперечному напрямку кожного з злитків. Результати механічних випробувань в залежності від рівня модифікаторів – факторів варіювання зведені в таблицю 3.

Таблиця 3

Механічні властивості сплавів експериментальних складів

Склад сплавів в кодовому масштабі				Фактичний склад, срд, %мас			Механічні властивості, срд	
№ сплаву	X ₁	X ₂	X ₃	Y	Re	B	σ _в , МПа (Y ₁)	δ, % (Y ₂)
1	+	+	+	0,21	0,20	0,19	615	0,6
2	+	+	-	0,21	0,19	0	551	0,8
3	+	-	-	0,19	0	0	507	0,6
4	-	-	-	0	0	0	285	0,4
5	-	-	+	0	0	0,21	500	0,6
6	-	+	+	0	0,19	0,21	527	0,4
7	+	-	+	0,20	0	0,21	446	0,4
8	-	+	-	0	0,19	0	610	0,6
Нульовий рівень (9)	0	0	0	0,10	0,09	0,11	800	1

Шляхом регресійного аналізу отримано ряд рівнянь, які показують залежність механічних властивостей титанового сплаву від вмісту факторів варіювання Y, Re та B. Після аналізу коефіцієнтів регресії на значимість та відкидання незначимих коефіцієнтів отримані рівняння у кодовому масштабі мали наступний вигляд:

$$Y_1 = 807,8365339 + 30,765198X_1 - 370,462485X_1^2 + 105,605891X_2^2 + 109,09515X_2 - 15,655536X_3^2 + 21,7347749X_3 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,6 + 0,1X_2 - 0,1X_3 - 0,1X_2X_3 + 0,1X_1X_2X_3 \quad (2)$$

Перевірка адекватності моделей за критерієм Фішера показала, що вони можуть бути використані для прогнозування значень функцій відгуку для будь-яких значень факторів між верхнім і нижнім рівнями.

Після переведення рівнянь в натуральний масштаб отримані залежності, що описують вплив відсоткового вмісту за масою модифікуючих елементів Y, Re та B на механічні властивості експериментального сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo:

$$\sigma_b = 365,729281 + 7716,90168Y - 1021,16632Re + 530,458469B - 37046,2485Y^2 + 10560,5891Re^2 - 1565,5536B^2; \quad (3)$$

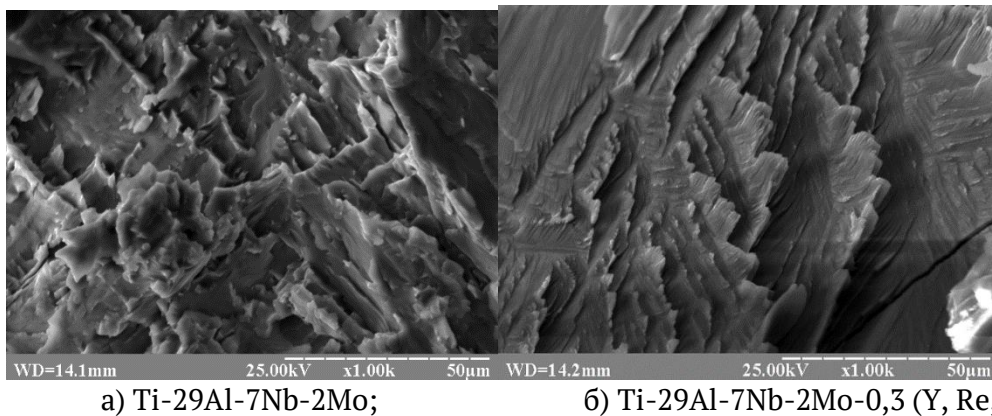
$$\delta = 0,40 + 0,98B + 3,12Re + 0,99Y - 20,27BRe - 9,64BY - 10,26ReY + 100,11BReY; \quad (4)$$

Використовуючи отриманні регресійні моделі розраховані значення в усіх точках плану експерименту. Аналіз отриманих розрахункових масивів у порівнянні з фактичними значеннями механічних властивостей виявив високий кореляційний зв'язок. Коефіцієнт кореляції функції $\sigma_b = f(Y, Re, B)$ склав $R = 0,92$, а для функції $\delta = f(Y, Re, B)$ відповідно $R = 0,998$.

Механізм дії модифікуючих елементів у складі сплаву полягає у адсорбції на поверхні зерен, що сприяє зміні поверхневої активності кристалів та швидкості дифузії і приводить до зміни форми та розмірів кристалів [5].

З використанням металографічного аналізу зразків дослідних сплавів встановлено, що введення ітрію призводить до фрагментації пластинок $(\alpha_2 + \gamma)$ -фаз, додавання ренію значно потоншує пластинки структурних складових сплавів, а введення бору сприяє формуванню пластинчастої структури з малим розміром колоній.

Аналіз зламів після механічних випробувань показав, що поверхня руйнування зразків вихідного сплаву без модифікаторів характеризується крихкими фасетками, що обумовлює низький рівень механічних властивостей (рисунок 1а). На поверхні руйнування зразків сплаву з комплексним модифікуванням спостерігаються однорідні дрібні ямки (рисунок 1б), наявність яких відповідає більш енергоємному процесу руйнування, а отже більшим значенням механічних властивостей.



а) Ti-29Al-7Nb-2Mo;

б) Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B)

Рисунок 1 – Фрактограми поверхні руйнувань зразків після механічних випробувань, x1000

Таким чином, при плануванні за схемою повного факторного експерименту реалізуються всі можливі комбінації факторів на всіх обраних для дослідження рівнях. При підстановці факторів варіювання, тобто вмісту модифікуючих елементів, у регресійні рівняння можна спрогнозувати результати механічних властивостей сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo.

Також в залежності від умов використання тієї чи іншої деталі двигуна висуваються різні вимоги до властивостей сплаву на основі алюмініду титану. Отриманні рівняння дають можливість розрахувати хімічний склад сплаву у відповідності до необхідного рівня властивостей матеріалу авіаційного виробу. Для лопатки 2 ступеня вільної турбіни, стосовно якої проведені розрахунки у роботі, вимогами за механічними властивостями є забезпечення рівня міцності $\geq 800 \text{ МПа}$ та пластичності $\delta \geq 1\%$. Задані властивості, згідно отриманих

рівнянь, досягаються при введенні у склад сплаву системи Ti-28Al-7Nb-2Mo близько 0,1% кожного з модифікуючих елементів.

Тобто оптимальний склад сплаву на основі алюмініду титану, що забезпечує значення механічних властивостей $\sigma_b \geq 800 \text{ МПа}$ та пластичності $\delta \geq 1\%$, відповідає системі Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B).

ЛІТЕРАТУРА

1. С.В. Ахонін, В.О. Березос, О.М. Пікулі та ін. Отримання жароміцних титанових сплавів системи Ti-Al-Zr-Si-Mo-Nb-Sn способом електронно-променевої плавки. Сучасна електрометалургія, 2022, #2, с.3-9. <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.01>.
2. Патон Б. Е., Саенко В. Я., Помарин Ю. М., Медовар Л. Б., Григоренко Г. М., Федоровский Б. Б. Дугошлаковый переплав - современное состояние и перспективы развития// Проблемы спецэлектрометаллургии. – 2002. – №1. – С.3. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/2002/01>.
3. Chen, B.; Ma, Y.; Gao, M.; Liu, K. Changes of Oxygen Content in Molten TiAl Alloys as a Function of Superheat during Vacuum Induction Melting. J. Mater. Sci. Technol. 2010, 26, 900–903. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(10\)60144-2](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(10)60144-2).
4. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520с. <https://i.twirpx.link/file/4038331/>.
5. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. – М.: Металлургиздат, 1964. – 214с. <https://i.twirpx.link/file/2189122/>.
6. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях /М.С. Винарский, М.В. Лурье – К.: Техника, 1975. – 168 с.
7. Reith M., Franke M., Schloffer M., Körner C. Processing 4th generation titanium aluminides via electron beam based additive manufacturing—characterization of microstructure and mechanical properties. Materialia 2020, 14. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100902>.
8. Wimler, D.; Lindemann, J.; Reith, M.; Kirchner, A.; Allen, M.; Vargas, W.G.; Franke, M.; Klöden, B.; Weißgärber, T.; Güther, V. et al. Designing advanced intermetallic titanium aluminide alloys for additive manufacturing. Intermetallics 2021, 131. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107109>.
9. Klein, T.; Usategui, L.; Rashkova, B.; Nó, M.L.; San Juan, J.; Clemens, H.; Mayer, S. Mechanical behavior and related microstructural aspects of a nano-lamellar TiAl alloy at elevated temperatures. Acta Mater. 2017, 128, 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.02.050>.
10. Хорев А.И. Комплексное легирование и микролегирование титановых сплавов / А.И. Хорев // Сварочное производство. – 2009. – № 6. – С.21–30.
11. Р.А.Гайсин, В.М.Имаев, Р.М.Имаев, Э.Р.Гайсина. Влияние модифицирования бором на рекристаллизационное поведение технически чистого титана при горячей деформации/Письма о материалах 5 (2), 2015, 124-128. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2015-2-124-128>
12. Н.М.Улякова. Влияние редкоземельных металлов на механические свойства и структуру жаропрочного титанового α -сплава/ Металловедение и термическая обработка металлов, №3, 1994.

REFERENCES

1. S.V. Akhonin, V.O. Berezos, O.M. Pikuly et al. Obtaining heat-resistant titanium alloys of the Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn system by electron beam melting. *Modern Electrometallurgy*, 2022, #2, p.3-9. <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.01>.
2. Paton B. E., Saenko V. Ya., Pomarin Yu. M., Medovar L. B., Grigorenko G. M., Fedorovsky B. B. Arc slag smelting - modern state and development prospects// *Problems of special electrometallurgy*. – 2002. – #1. – P.3. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/2002/01>.
3. Chen, B.; Ma, Y.; Gao, M.; Liu, K. Changes of Oxygen Content in Molten TiAl Alloys as a Function of Superheat during Vacuum Induction Melting. *J. Mater. Sci. Technol.* 2010, 26, 900–903. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(10\)60144-2](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(10)60144-2).
4. Ilin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svojstva. Spravochnik*. – M.: VILS-MATI, 2009. – 520s. <https://i.twirpx.link/file/4038331/>. (In Russian).
5. Malcev M.V. *Modificirovaniya struktury metallov i splavov*. – M.: Metallurgizdat, 1964. – 214s. <https://i.twirpx.link/file/2189122/>. (In Russian).
6. Vinarskij M.S. *Planirovanie eksperimenta v tehnologicheskikh issledovaniyah* /M.S. Vinarskij, M.V. Lure – K.: Tehnika, 1975. – 168 s. (In Russian)
7. Reith M., Franke M., Schloffer M., Körner C. Processing 4th generation titanium aluminides via electron beam based additive manufacturing–characterization of microstructure and mechanical properties. *Materialia* 2020, 14. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100902>.
8. Wimler, D.; Lindemann, J.; Reith, M.; Kirchner, A.; Allen, M.; Vargas, W.G.; Franke, M.; Klöden, B.; Weißgärber, T.; Güther, V. et al. Designing advanced intermetallic titanium aluminide alloys for additive manufacturing. *Intermetallics* 2021, 131. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107109>.
9. Klein, T.; Usategui, L.; Rashkova, B.; Nó, M.L.; San Juan, J.; Clemens, H.; Mayer, S. Mechanical behavior and related microstructural aspects of a nano-lamellar TiAl alloy at elevated temperatures. *Acta Mater.* 2017, 128, 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.02.050>.
10. Horev A.I. *Kompleksnoe legirovanie i mikrolegirovanie titanovykh splavov* / A.I. Horev // *Svarochnoe proizvodstvo*. – 2009. – № 6. – S.21-30. (In Russian).
11. R.A.Gajsin, V.M.Imaev, R.M.Imaev, E.R.Gajgina. Vliyanie modificirovaniya borom na rekristallizatsionnoe povedenie tehnikheski chistogo titana pri goryachej deformacii/Pisma o materialah 5 (2), 2015, 124-128.<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2015-2-124-128> (In Russian).
12. N.M.Ulyakova. Vliyanie redkozemelnykh metallov na mehanicheskie svojstva i strukturu zharoprochnogo titanovogo a-splava/ *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, №3, 1994. (In Russian)

Received 10.04.2025.

Accepted 25.04.2025.

UDC: 669.295:669.046.516

Olha Halienkova, Volodymyr Yefanov, Olexandr Zavgorodny, Viktoriia Bronetska,
Volodymyr Shevchenko

COMPLEX EFFECT OF MODIFICATION ON THE PROPERTIES OF γ -ALLOY BASED ON TITANIUM ALUMINIDE

Abstract. *Titanium aluminide-based alloys are a promising class of materials, the range of effective use of which is 600-800°C. The advantages of γ -alloys are low density, high structural stability, and heat resistance. The main forming technology for producing parts based on aluminides is casting, which forms a coarse-grained microstructure of the ingot with low values of strength and ductility characteristics. One of the practically feasible ways to improve the properties of γ -alloys is modification. The mechanism of action of modifying elements is adsorption on the surface of grains, which contributes to a change in the surface activity of crystals and the rate of diffusion and leads to a change in the shape and size of crystals. The effect of modifying elements Y, Re, and B on the properties of an alloy based on titanium aluminide of the Ti-28Al-7Nb-2Mo system was investigated using the full-factorial experimental design method. In accordance with the experimental planning matrix using a laboratory vacuum arc furnace with a copper water-cooled crystallizer, ingots of various compositions were melted. A study of the chemical composition, metallographic analysis of the macro- and microstructure, determination of mechanical properties, and analysis of the fracture surface of the samples after testing were carried out. The mechanical properties of the alloy – ultimate strength and ductility – were chosen as optimization parameters. The obtained regression equations make it possible to calculate the chemical composition of the alloy in accordance with the required level of material properties of the aviation product. Also, by substituting the content of modifying elements into the equation, it is possible to predict the results of the mechanical properties of an alloy based on titanium aluminide of the Ti-28Al-7Nb-2Mo system. The optimal composition of the titanium aluminide-based alloy was determined, which provides the value of mechanical properties $\sigma_s \geq 800\text{MPa}$ and plasticity $\delta \geq 1\%$.*

Keywords: *titanium aluminide, full-factor experiment, modifying elements, regression equations, optimization parameters, response function, mechanical properties.*

Галєнкова Ольга Борисівна, аспірантка кафедри енергетики УДУНТ, інженер 2 категорії АТ «Івченко-Прогрес», E-mail: olya.galenkova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0009-0008-6007-1931>.

Єфанов Володимир Сергійович, PhD, старший науковий співробітник, докторант кафедри енергетики УДУНТ, E-mail: vsyefanov@gmail.com, ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-6363-4081>

Завгородній Олександр Васильович, аспірант кафедри «Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій» Національного університету «Запорізька політехніка», E-mail: a.zav9009@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7198-1557>.

Бронецька Вікторія Ігорівна, аспірантка УДУНТ, Акціонерне товариство «Інститут Титану», E-mail: victoria.ihorevna@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4275-8260>.

Шевченко Володимир Григорович, к.т.н, завідувач кафедрою «Теоретична та прикладна механіка» НУ «Запорізька політехніка», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-6367>.

Olha Halienkova, PhD student of the Department of Energy USUNT, 2nd category engineer, JSC "Ivchenko-Progress", E-mail: olya.galenkova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0009-0008-6007-1931>.

Volodymyr Yefanov, PhD, senior researcher, doctoral student Department of Energy USUNT, E-mail: vsyefanov@gmail.com, ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-6363-4081>.

Olexandr Zavgorodny, graduate student Department of "Integrated technologies of welding and modeling of structures" National University "Zaporizhzhia Polytechnic", E-mail: a.zav9009@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7198-1557>.

Viktoriia Bronetska, PhD student of USUNT, joint stock company "Titanium institute", E-mail: victoria.ihorevna@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4275-8260>.

Volodymyr Shevchenko, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-6367>.