

УДК 669.295:669.046.516

doi: 10.32620/aktt.2025.2.02

О. Б. ГАЛЕНКОВА

АТ «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ, МЕХАНІЧНИХ ТА СЛУЖБОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ ДЛЯ ЛОПАТОК ТУРБІНИ

Предметом вивчення є закономірності формування структури та властивостей інтерметалідних γ -сплавів. **Мета** роботи – розробка складу та встановлення особливостей формування структури інтерметалідного γ -сплаву для забезпечення механічних та службових властивостей на рівні авіаційних сплавів на нікелевій та залізонікелевій основі. **Завдання роботи:** дослідження впливу модифікування на структуроутворення і механічні властивості при виплавці інтерметалідних γ -сплавів та визначення найбільш оптимального комплексного складу, дослідження впливу структури та фазового складу експериментального сплаву на його службові властивості, визначення механічних властивостей дослідних зразків, отриманих за схемою серійної технології, дослідження можливостей промислового виробництва лопаток турбіни з експериментального сплаву з використанням розрахунків та моделювання. Дослідження включало в себе визначення хімічного складу рентгеноспектральним методом, аналіз макро- та мікроструктури з використанням бінокулярного, оптичного та растрового електронного мікроскопів; температуру поліморфного визначали методом високотемпературного диференційного термічного аналізу; методом рентгенівської дифрактометрії проведено якісний та кількісний фазовий аналіз сплавів. В **результаті** проведеної роботи встановлено вплив модифікуючих елементів на структуру сплаву на основі алюмініду титану. Отримано регресійні рівняння залежності границі міцності та пластичності від вмісту модифікуючого елементу та визначено оптимальні концентрації модифікуючих елементів у складі дослідного сплаву на рівні 0,1% кожного, що забезпечують найбільш суттєве підвищення механічних властивостей. На підставі розрахункових даних та фрактографічного аналізу поверхні руйнувань зразків після механічних випробувань отриманий сплав оптимального складу Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3(Y, Re, V) з рівномірною дрібнозеренною структурою, що забезпечує властивості границі міцності ≥ 800 МПа та відносного подовження $\geq 1,0\%$. Отримано схему промислової технології виплавки злитків алюмініду титану експериментального складу методом електронно-променевої плавки, для якої розраховані і доведені оптимальні режими плавок, що забезпечують відсутність анізотропії за хімічним складом, як при введенні тугоплавких елементів у зливочного базового складу, так і при отриманні витратного електроду модифікованого складу при виплавці в кокіль. Проведено комплекс досліджень для підтвердження можливості використання дослідного сплаву в якості матеріалу для виготовлення лопатки 2 ступеню вільної турбіни наземних установок. На основі аналізу роботи та проведеного комплексу розрахункових даних зроблено **висновок** про можливість використання дослідного сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3(Y, Re, V) в якості матеріалу для виготовлення лопатки 2 ступеню вільної турбіни наземних установок, що підтверджено Актом впровадження №7 від 24.01.24р. на ДП «Івченко-Прогрес».

Ключові слова: алюмінід титану; легувальні елементи; модифікатори; електронно-променева плавка; вакуумно-дугова плавка; мікроструктура; механічні властивості; рентгенівська дифрактометрія; фазовий склад; лопатка турбіни; модальний аналіз; еквівалентні напруження; запас міцності.

1. Введення

Необхідність підвищення рівня робочих температур в області турбіни та строку служби ГТД нового покоління стимулює пошук і розробку принципово нових жароміцних матеріалів, що відрізняються від промислових нікелевих і більш легких титанових сплавів більшою термічною стабільністю структурно-фазового стану і, відповідно, більш високими робочими температурами. До числа таких сплавів

відносяться сплави на основі алюмініду титану, що мають низьку щільність, високу питому міцність, твердість, жаростійкість, кращу стійкість до окислення, порівняно зі звичайними титановими сплавами.

Алюмініди титану мають область ефективного використання 600...800°C [1, 2]. Для підтвердження та визначення цієї області важливим є проведення досліджень для конкретних авіаційних виробів, що працюють у високотемпературній області двигуна,



Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International

тобто в турбінній частині. Аналіз номенклатури деталей турбіни показав необхідність проведення досліджень для лопаток, що обґрунтовано складністю умов їх роботи, температурного та напруженого стану.

Дослідною модифікацією лопатки в роботі розглянуто робочу лопатку 2 ступеня вільної турбіни, що використовується на ряді двигунів наземних установок ДП «Івченко-Прогрес» та АТ «Мотор Січ».

Попередньо проведені розрахунки дослідної лопатки [3] підтвердили можливість використання сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3(Y, Re, B) у якості матеріалу для виготовлення лопатки дослідної модифікації замість серійного сплаву на нікелевій основі ВЖЛ12Э-ВІ.

Метою роботи є розробка складу та встановлення особливостей формування структури інтерметалідного γ -сплаву для забезпечення механічних та службових властивостей на рівні авіаційних сплавів на нікелевій та залізонікелевій основі.

2. Матеріали і методи дослідження

Отримання сплаву на експериментального складу Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3(Y, Re, B) передбачало проведення комплексу робіт, що включали в себе виплавку злитків для відпрацювання хімічного складу із забезпеченням заданого рівня механічних властивостей та реалізацію формуютьуючої технології промислового виробництва виготовлення лопаток турбіни.

Виплавка злитків базового та модифікованого складів здійснювалась у відповідності з матрицею планування експерименту. З аналізу літературних джерел встановлено інтервали варіювання модифікаторів, що складали 0...0,2%.

3. Результати та обговорення

Для відпрацювання хімічного складу використано лабораторну вакуумно-дугову піч з мідним водоохолоджувальним кристалізатором, що дозволяє уникнути газових домішок та запобігти привнесення сторонніх елементів у склад злитку. Отримані злитки експериментальних складів діаметром $\varnothing 90$ мм та висотою 15 мм (рис. 1) є достатнім об'ємом металу для відбору проб для визначення хімічного аналізу, фазового складу та виготовлення зразків для механічних випробувань.

Дослідження хімічного складу показало, що хімічний склад отриманих злитків близький до розрахункового, заданого матрицею планування.

Характерні макро- та мікроструктури отриманих злитків приведені на рис. 2 та 3.



Рис. 1. Зовнішній вигляд злитків експериментальних складів

Макроструктура сплаву вихідного сплаву (рис. 2, а) без модифікаторів складається з крупних блискучих зерен, що відповідають 8-9 балу 10-бальної шкали макроструктур титанових сплавів. Сумісний вплив трьох модифікаторів у кількості 0,1% кожен призвів до отримання рівномірної макроструктури 2-3 балу (рис. 2, д).

Мікроструктурним аналізом визначено, що введення ітрію призводить до глобуляризації та фрагментації структурних складових, введення бору сприяє формуванню пластинчастої структури з малим розміром колоній, а додавання ренію значно потоншує пластинки ($\alpha_2 + \gamma$)-фаз.

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 1.

Таблиця 1
Механічні властивості сплавів експериментальних складів

Система	Механічні властивості, срд	
	σ_B , МПа	δ , %
Ti-29Al-7Nb-2Mo	285	0,4
Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,2Y	507	0,6
Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,2Re	610	0,6
Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,2B	500	0,6
Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B)	800	1,0

Визначено, що при комплексному введенні модифікуючих елементів досягається підвищення рівня механічних властивостей дослідного сплаву майже у 2,5 рази порівняно із вихідними значеннями.

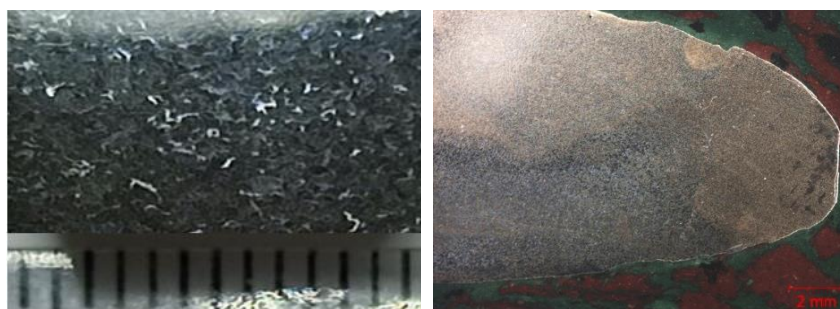
Аналіз зламів після проведення механічних випробувань показав, що поверхня руйнування зразків вихідного сплаву без модифікаторів характеризується крихкими фасетками, що обумовлює низький рівень механічних властивостей (рис. 4, а).



а) Ti-29Al-7Nb-2Mo;

б) Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,2Y;

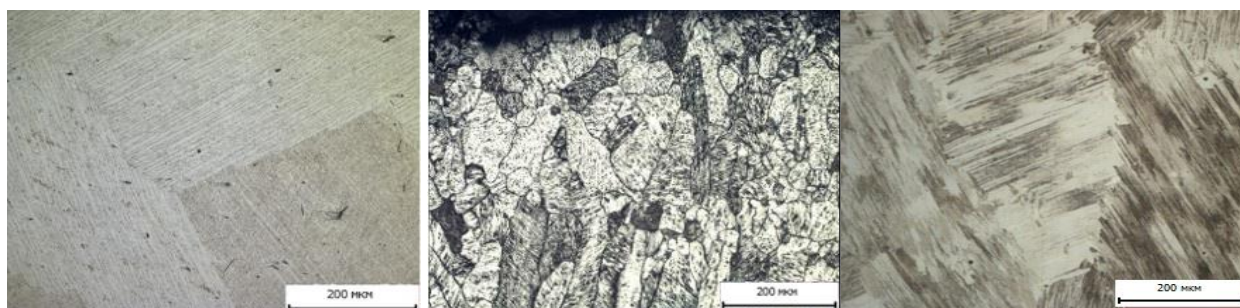
в) Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,2Re;



г) Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,2B;

д) Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B)

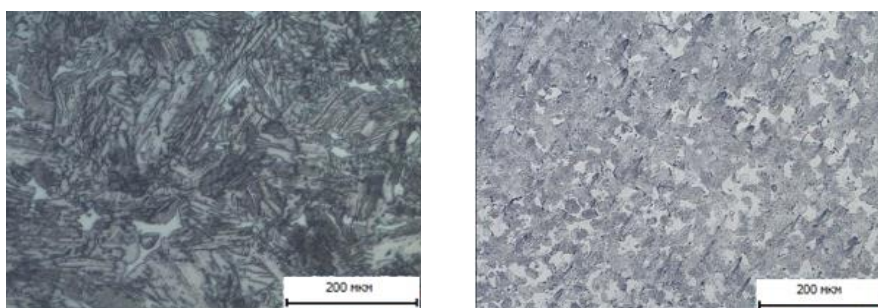
Рис. 2. Макроструктура злитків



а) Ti-29Al-7Nb-2Mo;

б) Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,2Y;

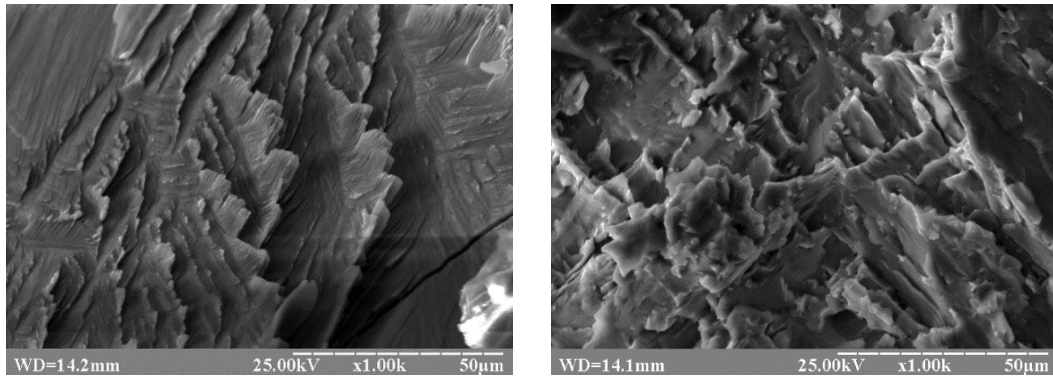
в) Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,2Re;



г) Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,2B;

д) Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B)

Рис. 3. Мікроструктура злитків після травлення, x200



а) Ti-29Al-7Nb-2Mo;

б) Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3(Y, Re, B)

Рис. 4. Фрактограми поверхні руйнувань зразків після механічних випробувань, $\times 1000$

На поверхні руйнування зразків сплаву з комплексним модифікуванням спостерігаються однорідні дрібні ямки (рис. 4, б), наявність яких відповідає більш енергоємному процесу руйнування, а отже більшим значенням механічних властивостей.

Шляхом регресійного аналізу отримані рівняння, що показують залежність механічних властивостей титанового сплаву від вмісту факторів варіювання Y, Re та B, графічний вигляд яких наведено на рис. 5.

З метою визначення оптимального вмісту елементів модифікуючого комплексу для отримання заданих показників механічних властивостей сплавів, побудовані графіки залежності $\sigma_B = f(\text{Re}, Y, B)$ та $\delta = f(\text{Re}, Y, B)$ при умові фіксування вмісту ренію на нульовому рівні плану експерименту ($\text{Re} = 0,09\%$).

Аналіз графіків залежності $\sigma_B = f(\text{Re}, Y, B)$ та $\delta = f(\text{Re}, Y, B)$ дозволив встановити, що забезпечення границі міцності сплаву на рівні $\geq 800 \text{ МПа}$ та відносного подовження $\geq 1,0\%$ досягається шляхом введення у склад сплаву $0,1\%$ кожного з модифікуючих елементів.

Таким чином, оптимальним складом експериментального сплаву на основі алюмініду титану визначено систему Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3(Re, Y, B).

Сплав оптимального складу передбачається використовувати у серійному виробництві, тому подальші розрахунки та дослідження доцільно виконувати на злитках отриманих саме для промислового виробництва.

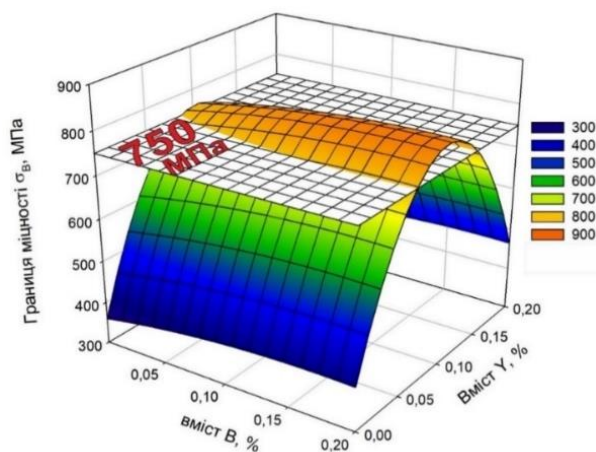
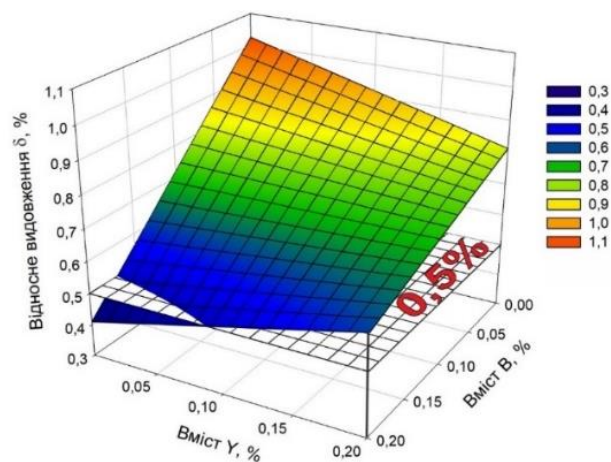
а) $\sigma_B = f(\text{Re}, Y, B)$, $\text{Re} = 0,09\%$;б) $\delta = f(\text{Re}, Y, B)$, $\text{Re} = 0,09\%$;

Рис. 5. Графіки залежності впливу Y та B на границю міцності та пластичність сплаву при $\text{Re} = 0,09\%$. На графіках додано технічну умову, яка вимагає рівень границі міцності сплаву $\geq 750 \text{ МПа}$ та пластичність $\geq 0,5\%$

В якості формуютьуючої технології для виробів зі сплаву на основі алюмінію титану обрано технологію лиття методом вакуумно-дугового переплаву (ВДП), що вимагає використання витратних електродів зі стабільним хімічним складом та властивостями.

Електроди для ВДП отримуються з крупногабаритних витратних електродів діаметром 195 мм сплаву базового складу, одержаних шляхом електронно-променевої плавки [4, 5]. Стабільність хімічного складу базового сплаву досягається шляхом подвійного переплаву. При першому переплаві до сплаву вводять тугоплавкі легуючі елементи – ніобій та молібден. При другому переплаві до отриманого

зливка додають алюміній з урахуванням втрат на випаровування. Це дає змогу мінімізувати втрати алюмінію та забезпечити гарантоване розчинення тугоплавких легуючих елементів та рівномірний їх розподіл по довжині та поперечному перерізу зливки.

Для отримання сплаву оптимального хімічного складу відрізаються частини злитків Ø195мм, дошхтовуються модифікаторами Y, Re та B і переплавляються з використанням вакуумно-дугової печі в графітовий тигель (рис. 6а), розливку металу проводять в кокіль (рис. 6б) [6]. Об'єм кінцевого виплавленого металу відповідає габаритам готового виробу, в даному випадку висоті лопатки (рис. 6в).

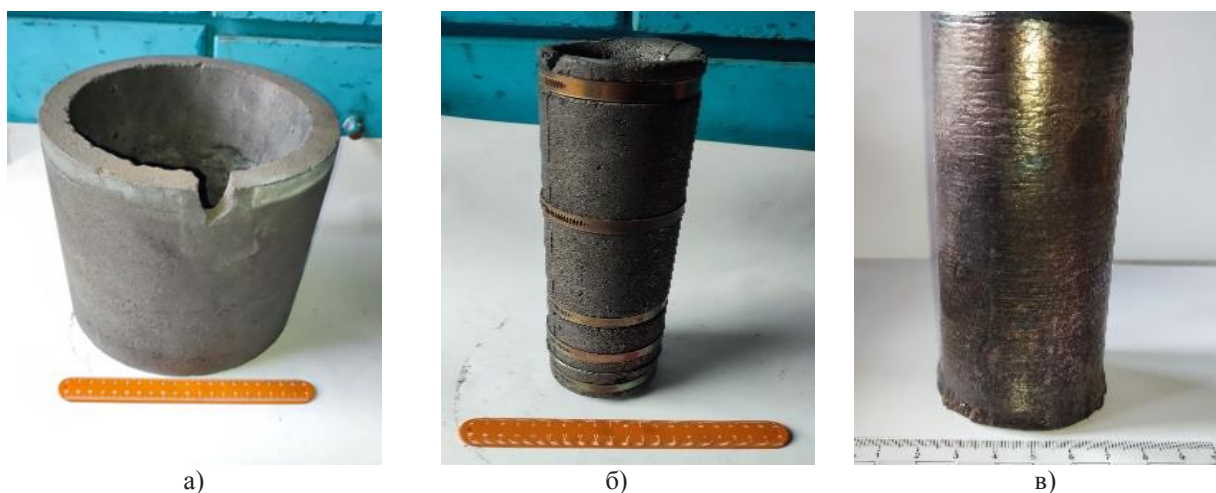


Рис. 6. Зовнішній вигляд графітового тигля (а) та графітового кокілю (б) для вакуумно-дугового переплаву та отриманого злитку (в)

Аналіз хімічного складу злитку оптимального складу Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3(Y,Re,B), виплавленого методом ВДП, виконувався по висоті злитка з верхньої, середньої та нижньої його частини (таблиця 2).

Таблиця 2

Хімічний склад дослідних злитків							
Місце відбору проб	Вміст елементів, % мас						
	Ti	Al	Nb	Mo	Y	Re	B
верх	осн	28,3	7,5	2,0	0,13	0,09	0,10
середина		28,7	7,6	1,8	0,09	0,12	0,10
низ		29,4	7,5	2,1	0,08	0,08	0,12

Результати хімічного складу показали досить рівномірний розподіл легуючих елементів по довжині

та висоті злитків, що підтверджується результатами рентгеноспектрального аналізу у режимі картування.

Від зливку відрізаний поперечний темплет та виготовлений макрошліф для контролю структури. Встановлено, що в злитку сформована однорідна та щільна структура. Дефектів у вигляді пор, раковин, тріщин, видимих неозброєним оком не виявлено.

Макроструктура злитку представлена зернами, що відповідають 2-3 балу шкали макроструктур (рис.7).



Рис. 7. Макроструктура злитку після травлення

Мікроструктура сплаву з модифікаторами характеризується дрібнозеренною ламельною ($\alpha_2 + \gamma$)-структурою з розмірами колоній пластинок не більше 30-40 мкм (рис. 8).

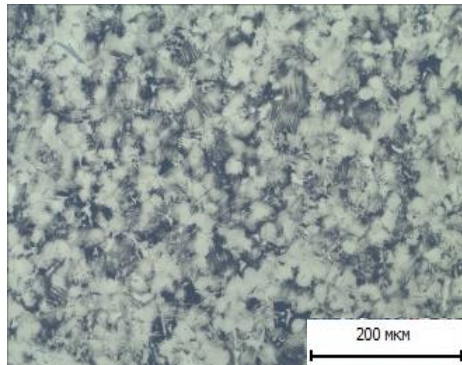


Рис. 8. Мікроструктура злитку після травлення, $\times 200$

Якісний та кількісний фазовий склад сплаву проведено методом рентгенівської дифрактометрії (рис. 9) та підтверджено, що фазовий склад сплаву відповідає суміші сполук α_2 та γ -фаз у кількості 14% та 86% відповідно (таблиця 3).

Результати механічних досліджень інтерметалідного сплаву оптимального складу Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, V) наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Механічні властивості та фазовий склад сплаву

σ_b , МПа	δ , %	Відсотковий вміст фази	
		γ	α_2
800...870	0,8...1,3	14	86

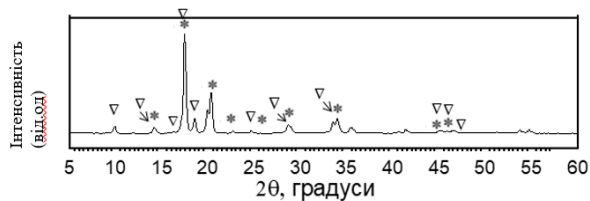


Рис. 9. Дифрактограма сплаву Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3(Y, Re, V):
* - TiAl ▽ - Ti₃Al

Встановлено, що при сумісному введенні модифікаторів досягається підвищення міцності матеріалу до 800 МПа та пластичності до 1,3%, тобто майже в 2,5 рази, порівняно зі сплавом без модифікаторів.

Методом високотемпературного диференційного термічного аналізу вивчені теплові ефекти, що спостерігаються при неперервному нагріві зразків з

дослідного сплаву (рис. 10). Встановлено, що ендоефект на діаграмі при температурі 1350-1400°C пов'язаний із переходом в β -область, тобто відповідає поліморфному перетворенню в сплав.

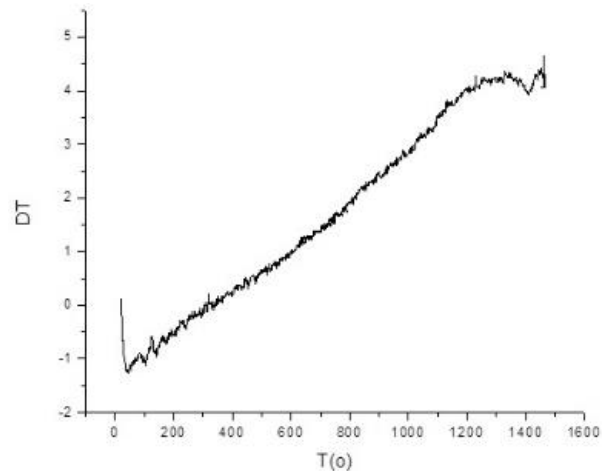


Рис. 10. Термограма нагріву сплаву

Визначені фізичні властивості сплаву. Густина матеріалу, визначена методом гідростатичного зважування, становить 4,75 г/см³; коефіцієнт лінійного розширення в інтервалі температур від кімнатної до 1000°C відповідає значенню $13,8 \cdot 10^{-6}$, K⁻¹.

Додатково проведено дослідження розподілу еквівалентних напружень лопатки, виготовленої з отриманого сплаву системи Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3(Y, Re, V) (рис. 11).

Визначено, що при використанні експериментального сплаву замість серійного сплаву ВЖЛ12Э-ВИ для виготовлення лопатки еквівалентні напруження зменшуються на 35%.

Підсумовуючи проведені розрахункові дані виконано порівняльний аналіз використання сплаву на основі алюмініду титану та серійного сплаву ВЖЛ12Э-ВИ для виготовлення лопаток 2 ступеня вільної турбіни (таблиця 4).

Встановлено, що густина експериментального сплаву нижча за серійний сплав, що дає змогу зменшення маси лопатки майже на 40%. Коефіцієнт лінійного розширення експериментального сплаву не більше від коефіцієнту лінійного розширення сплаву на нікелевій основі. Завдяки модифікуванню сплаву на основі алюмініду титану елементами Y, Re, V досягається підвищення міцності матеріалу до 800 МПа, що відповідає границі міцності сплаву ВЖЛ12Э-ВИ.

При використанні сплаву на основі алюмініду титану частоти власних коливань лопатки збільшуються, проте знаходяться далі від резонансної частоти. Еквівалентні напруження, максимальні з яких діють в кореневій частині пера лопатки, зменшуються з 716 МПа для сплаву ВЖЛ12Э-ВИ до 460 МПа

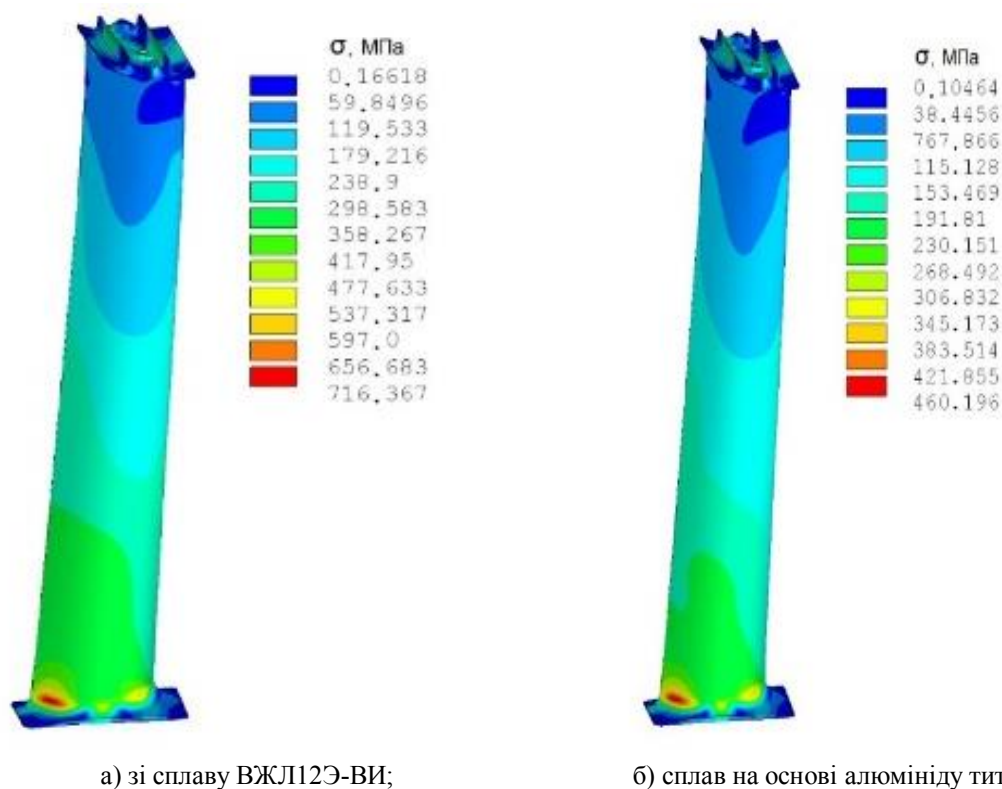


Рис. 11. Розподіл еквівалентних напружень у лопатці

для експериментального сплаву, тобто на 35% порівняно із вихідними значеннями. Отримані значення запасу не менше запасу міцності вихідного сплаву [2].

Таблиця 4
Порівняльний аналіз сплавів [3]

Характеристика	Стандартний сплав ВЖЛ12Э-ВИ	Дослідний сплав Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3(Y,Re,B)
ρ , г/см ³	7,9	4,75
α , 10 ⁶ К ⁻¹	13,8	13,8
σ_{100}^{800} , МПа	530	280
σ_B , МПа	830	800
δ , %	5	0,8...1,0
Маса однієї лопатки, гр	272	163
Частоти власних коливань	8346 9385	9062 9562
$\sigma_{скв}$, МПа	716	460
Відносний запас міцності	1,0	1,02

4. Висновки

1. Для сплаву на основі алюмініду титану IV покоління системи Ti-29Al-7Nb-2Mo доведена доцільність підвищення властивостей шляхом оптимізації модифікуючого комплексу Y, Re, B та удосконалення формуючих технологічних процесів лиття.

2. З використанням активного експерименту досліджено вплив легуючих та модифікуючих елементів Y, Re, B на структуру та механічні властивості сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-29Al-7Nb-2Mo.

Методом графоаналітичного аналізу та аналізу поверхні зламів після випробувань визначено сплав оптимального складу Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3(Y, Re, B) з рівномірною дрібнозеренною структурою з розмірами колоній пластин не більше 30 мкм та властивостями, що відповідають значенням границі міцності $\sigma_B \geq 800$ МПа та відносного подовження $\delta \geq 1,0\%$.

3. Отримано схему промисловій технології виплавки злитків алюмініду титану експериментального складу методом електронно-променевої плавки, що включає в себе виготовлення витратного електроду шляхом подвійного переплаву, подальшої дошихтовки модифікаторами для забезпечення оптимального хімічного складу з використанням вакуумно-

дугової печі з контрольованою атмосферою з подальшою розливкою металу у кокіль.

Для даної схеми розраховані і доведені оптимальні режими плавок, що забезпечують відсутність анізотропії за хімічним складом, як при введенні тугоплавких елементів у зливки базового складу, так і при отриманні витратного електроду модифікованого складу при виплавці в кокіль.

4. На основі аналізу роботи та проведеного комплексу розрахункових даних підтверджено можливість використання дослідного сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo-0,3(Y, Re, V) в якості матеріалу для виготовлення лопатки 2 ступеню вільної турбіни наземних установок, що підтверджено Актом впровадження №7 від 24.01.24р. на ДП «Івченко-Прогрес».

Напрямок майбутнього дослідження включає в себе виготовлення авіаційного виробу типу лопатка зі злитку сплаву на основі алюмініду титану, отриманого за схемою промислової технології.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що у нього немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Робота має пов'язані дані в сховищі даних

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *Microstructure Design and Its Effect on Mechanical Properties in Gamma Titanium Aluminides [Text]* / Xuqi Lui, Qia Lin, Wenjing Zhang, Constance Van Horne, & Limei Cha // *Metals*. – 2021. – Vol. 11, Iss. 10. – Article 1644. DOI: 10.3390/met11101644.

2. *Reducing the environmental embrittlement effect of TiAl alloys exposed to air at high temperatures by a fine-grained surface structure [Text]* / Christoph Stangl, Eva Kollmannsberger, Manja Krüger, Otto

Huber, Hubert Klaus, & Holger Saage // *Intermetallics*. – 2024. – Vol. 175. – Article no. 108479. DOI: 10.1016/j.intermet.2024.108479.

3. *Визначення власних частот та форм коливань лопатки турбіни, виготовленої зі сплаву на основі алюмініду титану [Текст]* / О. Б. Галєнкова, О. В. Овчинников, Р. Ю. Шакало, Р. П. Придорожний, & Д. О. Куц // *Авіаційно-космічна техніка і технології*. – 2024. – №2. – С. 49-56. DOI: 10.32620/aktt.2024.2.05.

4. *Ахонин, С. В. Одержання великогабаритних зливок алюмінідів титану способом ЕПП [Текст]* / С. В. Ахонин, Ю. А. Северин, & В. О. Березос // *Сучасна електрометалургія*. – 2020. – №2, – С. 18-22. DOI: 10.37434/sem2020.02.03.

5. *Математичне моделювання процесів випаровування при ЕПП сплавів на основі алюмініду титану системи легування Ti-Al-Nb-Cr-Mo [Текст]* / С. В. Ахонін, А. Ю. Северин, В. О. Березос, О. М. Пікулін, & О. Г. Єрохін // *Сучасна електрометалургія*. – 2022. – № 2. – С. 10-16. DOI: 10.37434/sem2022.02.02.

6. *Отримання перспективних сплавів на основі алюмінідів титану для сучасного авіадвигунобудування [Текст]* / О. В. Овчинников, С. В. Ахонін, В. О. Березос, А. Ю. Северин, О. Б. Галєнкова, & В. Г. Шевченко // *Сучасна електрометалургія*. – 2024. – № 1. – С. 9-16. DOI: 10.37434/sem2024.01.01.

References

1. Lui, X., Lin, Q., Zhang, W., Van Horne, C., & Cha, L. Microstructure Design and Its Effect on Mechanical Properties in Gamma Titanium Aluminides. *Metals*, 2021, vol. 11, iss. 10, article no. 1644. DOI: 10.3390/met11101644.

2. Stangl, C., Kollmannsberger, E., Krüger, M., Huber, O., Klaus, H., & Saage, H. Reducing the environmental embrittlement effect of TiAl alloys exposed to air at high temperatures by a fine-grained surface structure. *Intermetallics*. 2024, vol. 175, article no. 108479. DOI: 10.1016/j.intermet.2024.108479.

3. Halienkova, O. B., Ovchynnykov, O. V., Shakalo, R. Iu., Prydorozhnyi, R. P., & Kuts, D. O. Vyznachennya vlasnykh chastot ta form koly-van' lopatky turbiny, vyhotovlenoyi zi splavu na osnovi aluminidu tytanu [Determination of natural frequencies and forms of turbine blade oscillations made of an alloy based on titanium aluminide]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2024, no. 2, pp. 49-56. DOI: 10.32620/aktt.2024.2.05. (in Ukrainian).

4. Akhonin, S. V., Severin, A. Yu., Berezos, V. O., Pikulin, O. M., Glukhenkii, O. I., & Bondar, O. I. Oderzhannya velykohabarytnykh zlyvkiv aluminidiv tytanu sposobom EPP [Producing large-sized ingots of titanium aluminides by EBM method]. *Suchasna Elektrometallurgiya – Electrometallurgy Today*, 2020, no. 2, pp. 18-22. DOI: 10.37434/sem2020.02.03. (in Ukrainian).

5. Akhonin, S. V., Severin, A. Yu., Beresos, V. O., Pikulin, O. M., & Erokhin, O. G. Matematychno modelyuvannya protsesiv vyparovuvannya pry EPP splaviv na osnovi alyuminidu tytanu systemy lehuвання Ti–Al–Nb–Cr–Mo [Mathematical modeling of evaporation processes at EBM of alloys based on titanium aluminide of Ti–Al–Nb–Cr–Mo alloying system]. *Suchasna Elektrometallurgiya – Electrometallurgy Today*, no. 2, 2022, pp. 10-16. DOI: 10.37434/sem2022.02.02. (in Ukrainian).

6. Ovchinnikov, O. V., Akhonin, S. V., Beresos, V. O., Severin, A. Yu., Galenkova, O. B., & Shevchenko, V. G. Otrymannya perspektyvnykh splaviv na osnovi alyuminidiv tytanu dlya suchasnoho aviamotorobuduvannya [Producing advanced alloys based on titanium aluminides for modern aircraft engine manufacturing]. *Suchasna Elektrometallurgiya – Electrometallurgy Today*, 2024, no. 1, pp. 9-16. DOI: 10.37434/sem2024.01.01. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 15.12.2024, розглянута на редколегії 17.03.2025

FORMATION OF THE STRUCTURE, MECHANICAL AND SERVICE PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT TITANIUM ALUMINIDE ALLOYS FOR TURBINE BLADES

Olha Halienkova

The subject of study is the regularities of the formation of the structure and properties of intermetallic γ -alloys. The purpose of the work is to develop the composition and establish the features of the formation of the structure of the intermetallic γ -alloy to ensure mechanical and service properties comparable to aviation alloys based on a nickel and iron-nickel basis. Tasks of the work: to study the influence of modification on structure formation and mechanical properties during the smelting of intermetallic γ -alloys and to determine the most optimal complex composition, to study the influence of the structure and phase composition of the experimental alloy on its service properties; to determine the mechanical properties of experimental samples obtained using the serial technology scheme; to study the possibilities of industrial production of turbine blades from the experimental alloy using calculations and modeling. The study included the determination of the chemical composition by X-ray spectroscopy, and analysis of the macro- and microstructure using binocular, optical and scanning electron microscopes. The polymorphic temperature was determined by high-temperature differential thermal analysis. Qualitative and quantitative phase analysis of alloys was performed by X-ray diffractometry. As a result of the work, the influence of modifying elements on the structure of the alloy based on titanium aluminide was established. Regression equations describing the dependence of the ultimate tensile strength and ductility on the content of the modifying elements were obtained and the optimal concentrations of modifying elements in the composition of the experimental alloy were determined to be 0.1% each, which provide the most significant increase in mechanical properties. Based on the calculated data and fractographic analysis of the fracture surface of the samples after mechanical tests, an alloy of the optimal composition Ti-29Al-7Nb-2Mo-0.3 (Y, Re, B) with a uniform fine-grained structure was obtained. This alloy provides properties with an ultimate strength of ≥ 800 MPa and a relative elongation of $\geq 1.0\%$. A scheme for the industrial production of smelting titanium aluminide ingots with the experimental composition using the electron beam melting method was developed. For this process, the optimal melting modes were calculated and proven, ensuring the absence of chemical anisotropy – both when introducing refractory elements into the ingot of the base composition and when obtaining a consumable electrode of a modified composition during smelting in a chill mold. A set of studies was conducted to confirm the possibility of using the experimental alloy as a material for the manufacturing of a blade for the 2nd stage of a free turbine in ground-based installations. Based on the analysis of the work and the set of calculation data, a conclusion was drawn regarding the possibility of using the experimental alloy based on titanium aluminide in the Ti-28Al-7Nb-2Mo-0.3 (Y, Re, B) system as a material for the manufacturing of a blade of the 2nd stage of a free turbine in ground-based installations, which was confirmed by the Act of Implementation No. 7 dated 01/24/24 at the State Enterprise "Ivchenko-Progress".

Keywords: titanium aluminide; alloying elements; modifiers; electron beam melting; vacuum arc melting; microstructure; mechanical properties; X-ray diffractometry; phase composition; turbine blade; modal analysis; equivalent stresses; safety margin.

Галєнкова Ольга Борисівна – інженер 2 категорії ВГМет АТ «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Olha Halienkova – Engineer of the 2nd Category at the Department of the Chief Metallurgist, SE "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: olya.galenkova@gmail.com, ORCID: 0009-0008-6007-1931.