

# ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ $\beta$ -СТАБІЛІЗОВАНОГО ІНТЕРМЕТАЛІДНОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ TiAl ПІСЛЯ ІНДУКЦІЙНОЇ ЗОННОЇ ПЛАВКИ

Л.М. Лобанов, Ю.А. Асніс, Н.В. Піскун, І.І. Статкевич

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Досліджували інтерметалідний  $\beta$ -стабілізований сплав системи TiAl–Ti–44Al–5Nb–3Cr–1,5Zr (at. %), який був отриманий електронно-променевою плавкою. Заготовки литого сплаву повторно переплавляли способом індукційної безтигельної зонної плавки. Вказаний спосіб обробки є одним з найбільш привабливих для поліпшення структури зливку, що, в свою чергу, значно підвищує механічні характеристики сплаву. Описано обладнання для проведення високотемпературних механічних випробувань сплаву. Визначені такі механічні характеристики, як межа текучості, межа міцності, ступінь деформації при стисканні, а також модуль пружності і швидкість повзучості в вихідному стані і після індукційної безтигельної зонної плавки. По цих даних побудовані криві деформації. Показано, що індукційна безтигельна зонна плавка призвела до істотного збільшення високотемпературних характеристик сплаву Ti–44Al–5Nb–3Cr–1,5Zr. Бібліогр. 15, табл. 1, рис. 5.

*Ключові слова:* інтерметалідний сплав; система TiAl; високотемпературні механічні випробування; механічні характеристики; міцність; текучість; ступінь деформації; повзучість; пружність

Інтерметаліди на основі  $\gamma$ -TiAl є перспективними матеріалами для аерокосмічної техніки, автомобільної промисловості та інших галузей техніки. Вони відрізняються високою жароміцністю, повзучістю та корозійною стійкістю. Завдяки їх механічним властивостям інтерметаліди системи TiAl є оптимальними матеріалами для високотемпературних конструкцій [1]. Однією з найважливіших проблем сучасного металознавства є підвищення рівня механічних властивостей титанових сплавів, які в даний час широко застосовують для виготовлення деталей газотурбінних двигунів (ГТД). Останнім часом компанія «General Electric», що є лідером в будівництві авіадвигунів і використовує тільки новітні технології, повідомила про застосування інтерметалідних сплавів системи  $\gamma$ -TiAl в своєму найновішому серійному двигуні GE9x-1B для Boeing-787 Dreamliner. У турбіні низького тиску останні два ступені виготовлені з інтерметалідного сплаву системи TiAl. При цьому економия становить 180 кг матеріалу на один двигун в порівнянні з його попередником [2].

Роботи багатьох дослідників спрямовані на підвищення міцності і пластичності  $\gamma$ -TiAl в температурному діапазоні 800...850 °С, при якому працюють ГТД. Рациональний вибір для використання тих чи інших титанових сплавів в багатьох галузях сучасного виробництва нерозривно пов'язаний з аналізом їх поведінки при конкретних умовах експлуатації. Відомо, що в залежності від умов експлуатації виробів матеріал, з якого вони виготовлені, повинен мати певний комплекс механічних

властивостей [3]. Критичними параметрами, що найбільш часто зустрічаються при експлуатації, є навантаження в умовах високих температур.

Тому механічні властивості і їх стабільність є основними вимогами, що пред'являють до титанових сплавів, які використовують для виготовлення виробів відповідального призначення [4–6].

Для проведення досліджень в даній роботі використовували інтерметалідний сплав системи TiAl наступного складу: Ti–44Al–5Nb–3Cr–1,5Zr (at. %), який був отриманий способом електронно-променевої плавки. Зливки вихідного матеріалу мав нерівномірну грубу мікроструктуру, неоднорідний розподіл елементів по полю зливка, а також мікропори і мікротріщини. З метою поліпшення структури і підвищення механічних характеристик інтерметаліду зразки були переплавлені способом індукційної безтигельної зонної плавки (ІБЗП) [7, 8], яка дозволяє позбавитися вказаних мікроефектів та ін. При цьому відсутня пористість, так як усадка йде направлено на фронті кристалізації, а не в об'ємі зливка. Крім того ІБЗП забезпечує рівномірність розподілу структурних складових по довжині й об'єму зливка [9].

Механічні властивості сплаву безпосередньо залежать від його структурного стану [10]. Попередні дослідження структури показали, що мікроструктура вихідного матеріалу складається з ламелів  $\gamma$ -фази і голчастої  $\alpha_2$ -фази. При формуванні такої двофазної структури отриманий матеріал має низьку пластичність. Після застосування про-

Л.М. Лобанов — <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Ю.А. Асніс — <https://orcid.org/0000-0002-4697-8202>,

Н.В. Піскун — <https://orcid.org/0000-0003-1459-2310>, І.І. Статкевич — <https://orcid.org/0000-0001-9403-2123>



Рис. 1. Прилад DIL 805A/D для проведення високотемпературних досліджень

цесу ІБЗП на різних ділянках зливка формується трифазна структура, яка складається з  $\gamma$ -,  $(\gamma+\alpha_2)$ - і  $\beta_2$ -фаз. Структурні дослідження детально описані в роботах [11, 12]. Будучи пластичною, стабілізована фаза  $\beta(Ti)/\beta_2$  впливає на підвищення механічних характеристик сплавів як при кімнатній, так і при високих температурах, а також грає позитивну роль в поліпшенні оброблюваності і, відповідно, застосування цих сплавів.

Мета даної роботи — проведення високотемпературних механічних випробувань даного сплаву у вихідному стані і після обробки способом ІБЗП.

**Високотемпературні випробування зразків.**

Стиснення циліндричних зразків є одним з найбільш м'яких видів випробування і тому його застосування доцільно для крихких матеріалів. Інтерметаліди системи TiAl є малопластичними (а в ряді випадків крихкими) матеріалами, тому останнім часом фахівці, що займаються вивченням цих матеріалів, їх механічні характеристики визначають методом випробування на стиснення.

Зразки сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr були піддані випробуванням на високотемпературне стиснення при температурах 700...1050 °C. Тем-

пература 700 °C є температурою в'язко-крихкого переходу для  $\gamma$ -TiAl інтерметалідів.

Основні принципи і методичні рекомендації, що застосовуються при випробуваннях металевих матеріалів на стиск, в тому числі при підвищених температурах, сформульовані в ГОСТ 8817-82 [13] і ГОСТ 25.503-97 [14].

Для визначення високотемпературних механічних характеристик інтерметаліду, а також для побудови залежності фізико-механічних властивостей сплаву від температури, високотемпературні дослідження були проведені з використанням дилатометру DIL 805A/D з можливістю деформації зразка при стисненні (рис. 1) [15].

Випробування на стиск при температурах 700...1050 °C проводили в вакуумі  $10^{-5}$  Па. Пристрій працював під дією статичних навантажень від 1 до 700 МПа.

Принцип дії дилатометра заснований на вимірюванні змін лінійних розмірів зразка, викликаних зміною температури і механічного навантаження. Прилад повністю автоматизований, з автономними пристроями, які використовуються для вимірювання змін розмірів в екстремальних умовах контрольованого нагріву та охолодження. Дослідження проводяться при температурах від -160 до 1500 °C зі швидкістю нагріву до 4000 °C/c і охолодження до 2500 °C/c, що дозволяє точно імітувати реакцію матеріалу для будь-якого виробничого процесу. Деформаційний модуль DIL 805A/D приладу дозволяє деформувати зразок при відповідній температурі і з різними деформаційними параметрами з контрольованою швидкістю деформації від 0,01 до 200 мм/с. За допомогою цього приладу в інтервалі температур 700...1050 °C були визначені: межа міцності та текучості, ступень деформації при стисненні, модуль пружності, а також швидкість повзучості.

В роботі використані циліндричні зразки сплаву, що досліджували, висотою 10 мм і діаметром

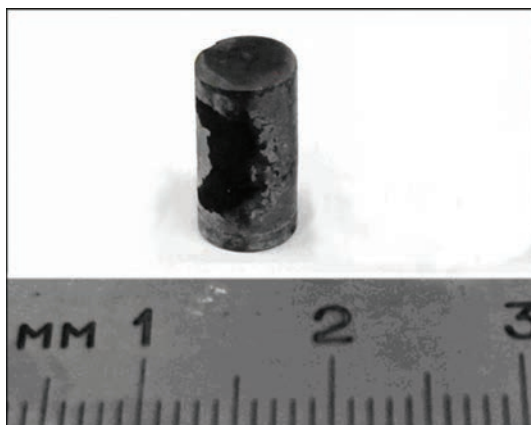


Рис. 2. Зовнішній вигляд зразка для випробування на стиснення

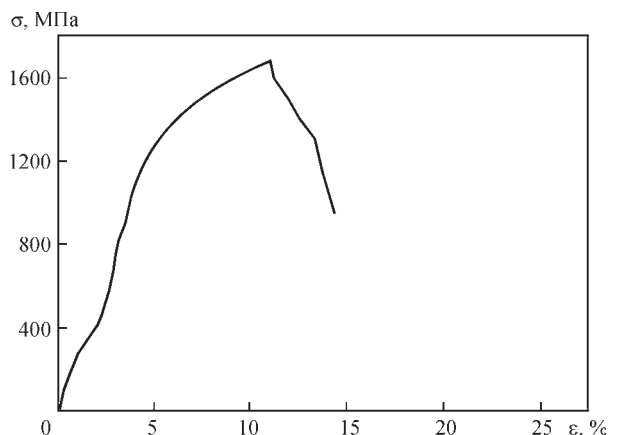


Рис. 3. Крива деформації при випробуваннях на стиснення зразків при температурі 700 °C

Механічні властивості зразків після високотемпературної деформації

Температура випробувань, °С	Модуль пружності, ГПа		Межа текучості, МПа		Межа міцності, МПа	
	Вихідний сплав	Після ІБЗП	Вихідний сплав	Після ІБЗП	Вихідний сплав	Після ІБЗП
850	86	107	480	610	530	630
900	75	95	370	550	400	570
950	64	94	275	470	330	480
1000	55	83	260	430	250	430
1050	39	70	150	340	165	370

5 мм (рис. 2). Їх вимірювання до і після деформації проводили з точністю  $\pm 0,01$  мм.

Оскільки, як зазначалося вище, 700 °С є температурою в'язко-крихкого переходу для  $\gamma$ -TiAl сплавів, при цій температурі були проведені високотемпературні випробування зразків після ІБЗП. На рис. 3 приведена термдеформаційна крива випробування на стиск при температурі 700 °С.

З наведеної кривої випливає, що деформація на стиск становить 10 %. При цьому зразок повністю зруйнувався.

На рис. 4 показані характерні термдеформаційні криві залежності  $\sigma$  від  $\epsilon$  для зразків після ІБЗП та деформації при 900 °С. З наведених на графіку даних випливає, що після ІБЗП пластичність значно зростає (до 50 %) у порівнянні з вихідним матеріалом.

Під час випробування при температурі 900 °С відбулося деформування зразка, але він не зруйнувався.

Крім того, для порівняння, при температурі 900 °С був випробуваний зразок вихідного матеріалу.

З аналізу наведених деформаційних кривих видно, що при температурі 700 °С (рис. 3) деформація при стисненні досягає тільки 10 % та відбувається руйнування зразка, що пов'язано, як було сказано вище, з температурою в'язко-крихкого переходу матеріалу. На відміну від цього деформація при випробуваннях при температурі 900 °С (рис. 4) досягає майже 50 % без руйнування зразка. Цей факт свідчить про можливу високу пластичність при темпе-

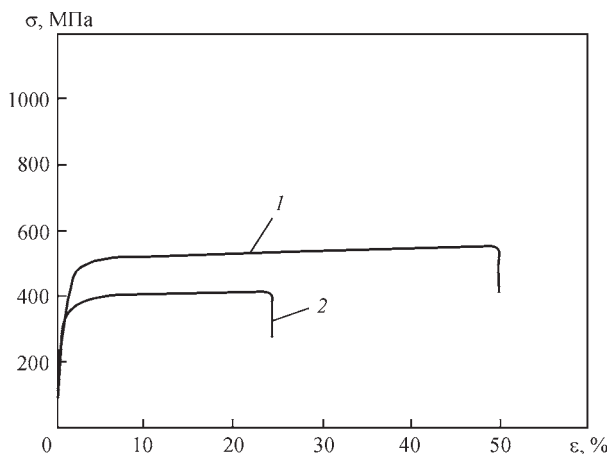


Рис. 4. Криві деформації при випробуваннях на стиснення зразків при температурі 900 °С: 1 — інтерметаліду після ІБЗП; 2 — з вихідного матеріалу

ратурах експлуатації газотурбінних двигунів (зразок вихідного матеріалу деформувався при 24 %).

Результати високотемпературних випробувань наведені в таблиці.

Для порівняння в таблиці наведені високотемпературні властивості вихідного інтерметалідного сплаву.

Аналізуючи ці дані можна зробити висновок, що у зразків, які були переплавлені способом ІБЗП, значення показників високотемпературних властивостей вищі, ніж у зразків вихідного сплаву.

Слід звернути увагу, що при температурі 850 °С (робоча температура ГТД) параметри деформації після ІБЗП вищі, ніж у вихідного матеріалу.

Крім вказаних вище параметрів на приладі DIL 805A/D були проведені дослідження залежності швидкості повзучості від температури (рис. 5).

Криві повзучості в залежності від температури показують, що при навантаженні 200 МПа, яке досягається під дією газового потоку в ГТД останнього покоління, перші ознаки повзучості зразків після ІБЗП з'являються тільки при температурі вище 950 °С. В той же час, для вихідного матеріалу ці ж ознаки з'являються при температурі 800 °С. Ці показники дуже важливі для підвищення працездатності газотурбінного двигуна.

Таким чином, верхня температурна межа застосовності сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr може бути збільшена з 750...800 до 950 °С.

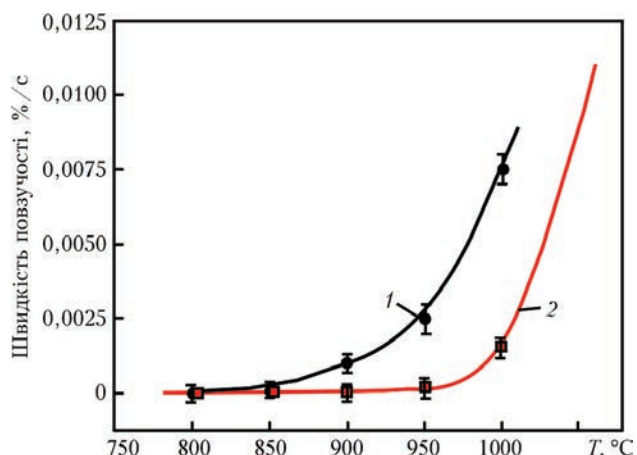


Рис. 5. Залежність швидкості повзучості вихідного (1) та після ІБЗП (2) сплавів від температури

Крім того значення високотемпературної пружності у зразків після ІБЗП зростають у 1,5 рази в порівнянні з вихідним матеріалом при температурі 950 °С, що дуже важливо для роботи авіаційних двигунів.

### Висновки

1. Випробування на високотемпературне стиснення зразків сплаву Ti–44Al–5Nb–3Cr–1,5Zr (ат. %) показали, що при температурі 700 °С деформація при стисненні досягає 10 % і відбувається руйнування зразка.

2. Результати високотемпературних випробувань зразків сплаву Ti–44Al–5Nb–3Cr–1,5Zr (ат. %) показали, що ІБЗП призвела до істотного підвищення механічних властивостей, а саме: міцності, текучості, модуля пружності і опору повзучості в порівнянні з цими ж показниками вихідного матеріалу.

3. Встановлено, що при навантаженні 200 МПа перші ознаки повзучості зразків після ІБЗП з'являються при температурі вище 950 °С.

4. Показано, що значення високотемпературної пружності зразків ІБЗП зростають у 1,5 рази в порівнянні з вихідним матеріалом при температурі 950 °С, що дуже важливо для роботи авіаційних двигунів.

5. На основі комплексу досліджень високотемпературних механічних властивостей β-стабілізованого інтерметалідного сплаву системи TiAl встановлено, що верхня температурна межа застосовності цього матеріалу після індукційної безтигельної зонної плавки може бути збільшена з 750...800 до 950 °С.

### Список літератури

1. Appel F., Paul J.D.H., Oering M. (2011) *Gamma titanium aluminide alloys: Science and technology*. WILEY-VCH, Weinheim.
2. Глотка Т.А., Перепелкина М.Н., Омельченко О.С. (2016) Механические свойства сложного легированного титанового сплава, полученного интенсивной пластической деформацией. Строительство. Материаловедение. *Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения*, **90**, 71–77.
3. Фридман Л.Б. (1974) *Механические свойства металлов*. Москва, Машиностроение.
4. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Каряковцев А.С. (2010) *Современные титановые сплавы и проблемы их развития*. Москва, ВИАМ.
5. Антасhev В.Г., Ночовная Н.А., Ширяев А.А. и др. (2011) Перспективы разработки новых титановых сплавов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*, **2**, 60–67.
6. Антонюк С.Л., Моляр А.Г., Калинин А.Н. и др. (2003) Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины. *Современная электрометаллургия*, **1**, 10–14.
7. Поварова К.Б., Банньих О.А. (1999) Принципы создания конструкционных сплавов на основе интерметаллидов. Часть I. *Материаловедение*, **2**, 27–32.

8. Лобанов Л.М., Аснис Е.А., Пискун Н.В., Статкевич И.И. (2018) Улучшение структуры и механических характеристик конструкционных интерметаллидов системы титан–алюминий при направленной кристаллизации. *Доповіди НАНУ*, **12**, 51–60.
9. Брун М.Я., Солдатенко И.В., Быкова Л.А. (1992) Структура и механические свойства нового жаропрочного титанового сплава VT25U. *MiTOM*, **1**, 29–31.
10. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V. et al. (2017) Room-temperature tensile properties of float-zone processed β-stabilized γ-TiAl(Nb, Cr, Zr) intermetallic. *J. Materials Letters*, **188**, 88–91.
11. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties control of γ-TiAl(Nb, Cr, Zr) intermetallic alloy by induction float zone processing. *J. Alloys Compd.*, **643**, 182–186.
12. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V. et al. (2016) A promising microstructure/deformability adjustment of β-stabilized γ-TiAl intermetallics. *J. Materials Letters*, **162**, 180–184.
13. ГОСТ 8817–82: *Металлы. Метод испытания на осадку*.
14. ГОСТ 25.503–97: *Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие*.
15. Картавых А.В., Чердынцев В.В., Степашкин А.А., Горшенков М.В. (2013) Высокотемпературная дилатометрия жаропрочного сплава Ti–46Al–8N. *Металлы*, **4**, 62–69.

### References

1. Appel, F., Paul, J.D.H., Oering, M. (2011) *Gamma titanium aluminide alloys: Science and technology*. WILEY-VCH, Weinheim.
2. Glotka, T.A., Perepelkina, M.N., Omelchenko, O.S. (2016) The mechanical properties of complex alloyed titanium alloy, obtained by intensive plastic deformation. Construction. Materials science. *Mashinostroenie. Series: Starodubov readings*, **90**, 71–77 [in Russian].
3. Friedman, L.B. (1974) *Mechanical properties of metals*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. Inozemtsev, A.A., Bashkatov, I.G., Karyakovtsev, A.S. (2010) *Modern titanium alloys and problems of their development*. Moscow, VIAM, 60–67 [in Russian].
5. Antashev, V.G., Nochovnaya, N.A., Shiryayev, A.A. et al. (2011) Prospects for the development of new titanium alloys. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman*, **2**, 60–67 [in Russian].
6. Antonyuk, S.L., Molyar, A.G., Kalinyuk, A.N. et al. (2003) Titanium alloys for the aviation industry of Ukraine. *Advances in Electrometallurgy*, **1**, 9–12.
7. Povarova, K.B., Bannykh, O.A. (1999) Principles of the construction of structural alloys on the basis of intermetallics. Pt 1. *Materialovedenie*, **2**, 27–32 [in Russian].
8. Lobanov, L.M., Asnis, E.A., Piskun, N.V., Statkevich, I.I. (2018) Improvement of the structure and mechanical characteristics of structural intermetallics of titanium–aluminum system at directional solidification. *Dopovidi NANU*, **12**, 51–60 [in Russian].
9. Brun, M.Ya., Soldatenko, I.V., Bykova, L.A. (1992) Structure and mechanical properties of new heat-resistant titanium alloy VT25U. *MiTOM*, **1**, 29–31 [in Russian].
10. Kartavykh, A.V., Asnis, E.A., Piskun, N.V. et al. (2017) Room-temperature tensile properties of float-zone processed β-stabilized γ-TiAl(Nb, Cr, Zr) intermetallic. *J. Materials Letters*, **188**, 88–91.
11. Kartavykh, A.V., Asnis, E.A., Piskun, N.V. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties control of γ-TiAl(Nb,

- Cr, Zr) intermetallic alloy by induction float zone processing. *J. Alloys Compd.*, **643**, 182–186.
12. Kartavykh, A.V., Asnis, E.A., Piskun, N.V. et al. (2016) A promising microstructure/deformability adjustment of  $\beta$ -stabilized  $\gamma$ -TiAl intermetallics. *J. Materials Letters*, **162**, 180–184.
13. GOST 8817–82: *Metals. Upsetting test method* [in Russian].
14. GOST 25.503–97: *Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. Compression test method* [in Russian].
15. Kartavykh, A.V., Cherdynstev, V.V., Stepashkin, A.A., Gorshenkov, M.V. (2013) High-temperature dilatometry of heat-resistant alloy Ti–46Al–8N. *Metally*, **4**, 62–69 [in Russian].

HIGH-TEMPERATURE MECHANICAL PROPERTIES  
OF  $\beta$ -STABILIZED INTERMETALLIC ALLOY  
OF TiAl SYSTEM AFTER INDUCTION ZONE MELTING

L.M. Lobanov, E.A. Asnis, N.V. Piskun, I.I. Statkevich  
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

Intermetallic  $\beta$ -stabilized alloy of TiAl–Ti–44Al–5Nb–3Cr–1.5Zr (at. %) system, which was obtained by electron beam melting was investigated. The cast alloy blanks were re-melted by the method of induction crucibleless zone melting. This processing method is one of the most attractive for improving the structure of the ingot, which, in its turn, significantly improves the mechanical properties of the alloy. The paper describes the equipment for high-temperature mechanical testing of the alloy. Such mechanical characteristics as yield strength, tensile strength, degree of deformation during compression, as well as the modulus of elasticity and creep rate in the initial state and after ICZM were determined. Deformation curves were plotted from these data. The test results showed that ICZM led to a significant improvement of the high-temperature characteristics of Ti–44Al–5Nb–3Cr–1.5Zr alloy. Ref. 15, Tabl. 1, Fig. 5.

*Key words:* intermetallic alloy; TiAl system; high-temperature mechanical tests; mechanical characteristics; strength; yield; degree of deformation; creep; elasticity

Надійшла до редакції 04.06.2020

ВЕДУЩАЯ ВЫСТАВКА В МИРЕ  
СВАРКА • РЕЗКА • ОБРАБОТКА

LET'S JOIN  
THE WORLD!

13.–17. сентября 2021

РЕГИСТРИРУЙТЕСЬ  
СЕЙЧАС!

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN  
No. 1 IN THE WORLD