

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.08.051>

УДК 669. 187. 2

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

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ  
E-mail: asnis@paton.kiev.ua, nadamova54@gmail.com

## **Вдосконалення механічних властивостей β-стабілізованих інтерметалідів системи TiAl методом зонної перекристалізації**

*Представлено академіком НАН України Л.М. Лобановим*

*Досліджені механічні властивості інтерметалідного сплаву системи TiAl наступного складу: Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат.%). З метою оптимізації структури і властивостей цей сплав був переплавлений методом індукційної безтигельної зонної плавки (ІБЗП). Відпрацьована методика випробувань на розтяг та стиснення інтерметаліду системи TiAl, як у вихідному стані, так і після індукційної зонної плавки. Результати випробувань на розтяг вихідного матеріалу показали, що тимчасовий опір розриву при кімнатній температурі (+20 °С) дорівнює 240,5 МПа, а пластичність, практично, не спостерігається. Аналогічні випробування зразків, що пройшли обробку методом ІБЗП показали значення межі текучості – 837 МПа, межі міцності – 983 МПа і подовження δ – 1,45 %.*

*Інтерметаліди системи TiAl при кімнатній температурі є малопластичними матеріалами і при випробуванні їх на одночасне розтягнення крихке руйнування зразка настає відразу в пружній області. У зв'язку з тим, що стиснення – один з найбільш м'яких видів випробувань було прийнято рішення подаліш випробування з метою визначення механічних характеристик проводити на стиснення.*

*Дослідження проводилися на машині Instron 8802 за допомогою спеціальних пристроїв, які були розроблені для плоских та циліндричних зразків відповідно до стандарту ASTM D695.*

*Це дозволило визначити такі механічні характеристики, як межа текучості і межа міцності, а також ступінь деформації при стисненні ε, % для вихідного матеріалу. За цими даними були побудовані криві деформації.*

*З метою порівняння механічних властивостей вихідного сплаву, які одержані різними методами випробування – на розтяг та на стиснення, були також проведені випробування на стиск зразків після зонної перекристалізації. Показано, що механічні властивості сплаву, які були визначені при випробуванні на стиснення, значно вищі, ніж ті, які одержані при випробуванні на розтяг.*

**Ключові слова:** інтерметалідний сплав, механічні випробування, межа міцності, межа текучості, подовження, випробування на розтяг, випробування на стиснення.

Цитування: Лобанов Л.М., Асніс Ю.А., Піскун Н.В., Статкевич І.І. Вдосконалення механічних властивостей β-стабілізованих інтерметалідів системи TiAl методом зонної перекристалізації. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2020. № 8. С. 51–56. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.08.051>

Інтерметалідні сплави системи TiAl є перспективними матеріалами для аерокосмічної техніки, автомобільної промисловості та інших галузей техніки. Їм властиві висока міцність, жароміцність, повзучість та корозійна стійкість при високих температурах. Завдяки низькій щільності, високій жорсткості, питомій міцності і стійкої повзучості інтерметалідні сплави системи TiAl є привабливими матеріалами для високотемпературних конструкцій. Однак їх низька пластичність при кімнатній температурі і пов'язана з цим низька технологічність ускладнює, а в ряді випадків виключає можливість виготовлення напівфабрикатів і виробів з цих матеріалів. Це обмежує їх широке застосування в конструкціях турбін авіаційних двигунів, деталях автомобільної промисловості і деяких інших галузях [1, 2]. Тому в даний час зусилля дослідників спрямовані на отримання сплавів різного хімічного складу і методів спрямованих на збільшення пластичності і, відповідно, технологічності при кімнатній температурі. Одним з таких напрямків є створення  $\beta$ -стабілізованих інтерметалідів системи TiAl з невеликим вмістом ніобію, цирконію та хрому методом електронно-променевої плавки з подальшою зонною перекристалізацією.

Для проведення досліджень в даній роботі використовувався інтерметалідний сплав системи TiAl наступного складу — Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат.%), який був одержаний за допомогою електронно-променевої плавки з подальшою зонною перекристалізацією методом індукційної зонної плавки.

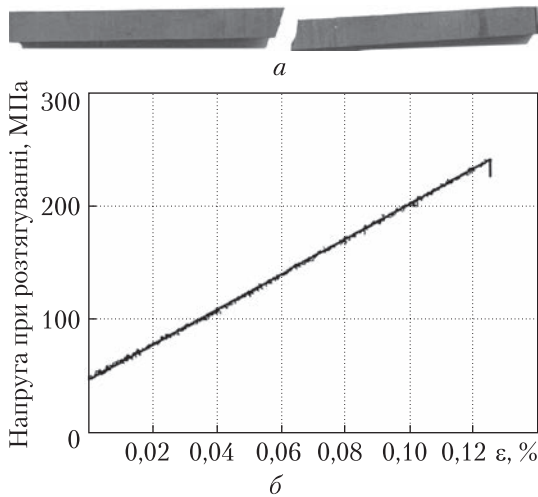
Первинний зливок, одержаний методом електронно-променевої плавки, мав нерівномірну грубу мікроструктуру, неоднорідний розподіл елементів по полю зливка, а також мікрופори і мікротріщини. Всі ці недоліки і визначали його низькі механічні властивості при кімнатній температурі.

Як було вказано вище, одним із способів поліпшення структури і підвищення механічних характеристик інтерметаліду є індукційна безтигельна зонна плавка (ІБЗП) [3, 4]. Такий процес дозволяє керувати структурою отриманого матеріалу; забезпечувати рівномірність розподілу структурних складових по довжині й об'єму зливка. Змінюючи параметри процесу плавки, можна отримувати необхідну структуру зливка [5]. Крім того, умовами плавки забезпечується чистота процесу — немає взаємодії з матеріалом тигля. Відомо, що механічні властивості сплаву безпосередньо залежать від його структурного стану [6, 7].

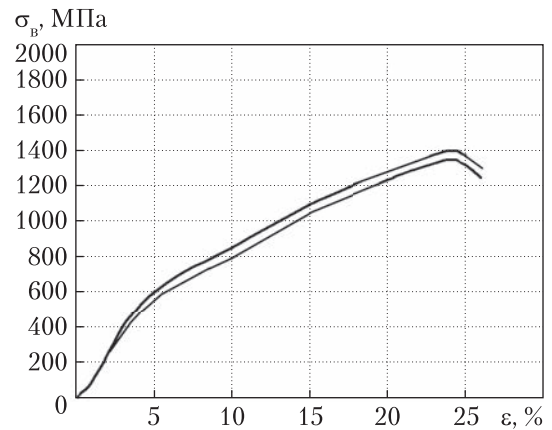
Мета роботи — проведення механічних випробувань вказаного сплаву у вихідному стані та після перекристалізації методом ІБЗП, порівняння механічних властивостей сплаву, які одержані різними методами випробування.

**Механічні випробування вихідного матеріалу.** Випробування на короткочасне розтягнення зразків при кімнатній температурі (+20 °C) згідно з методикою, що регламентується ГОСТ 1497-84 [8], на підставі якого отримані діаграми деформування зразків інтерметаліду і його механічні характеристики, проводилися на обладнанні, що включає сервогідравлічну машину Instron 8802. Для цього були виготовлені спеціальні захватні пристосування. Досліджувалися зразки з номінальним перетином 4×2 мм і довжиною робочої частини 50 мм.

До зразка прикладалося зусилля, яке не перевищувало половини величини передбачуваного зусилля текучості. За показаннями екстензометра записували графік в координатах  $\sigma - \epsilon$ , де  $\sigma$  — напруга, а  $\epsilon$  — відносна деформація в %. Зразки піддавалися розтягуванню з постійною швидкістю 0,01мм/с до розриву. При цьому визначалися значення наступних



**Рис. 1.** Випробування на розтягнення вихідного матеріалу інтерметаліду: *a* — зовнішній вигляд зразка після розриву при кімнатній температурі; *б* — діаграма деформування зразка



**Рис. 2.** Криві деформації для вихідного матеріалу

механічних характеристик: межа міцності  $\sigma_b$ ; межа текучості  $\sigma_{02}$ ; відносне подовження зразка після розриву  $\delta, \%$  та відносне звуження зразка після розриву  $\psi$ .

Зразок зі сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат.%) після розриву та діаграма його деформування показані на рис. 1, а, б.

Діаграма відображає процес пружного деформування і крихкого руйнування матеріалу. Визначалися значення тимчасового опору розриву  $\sigma_b = 240,5$  МПа.

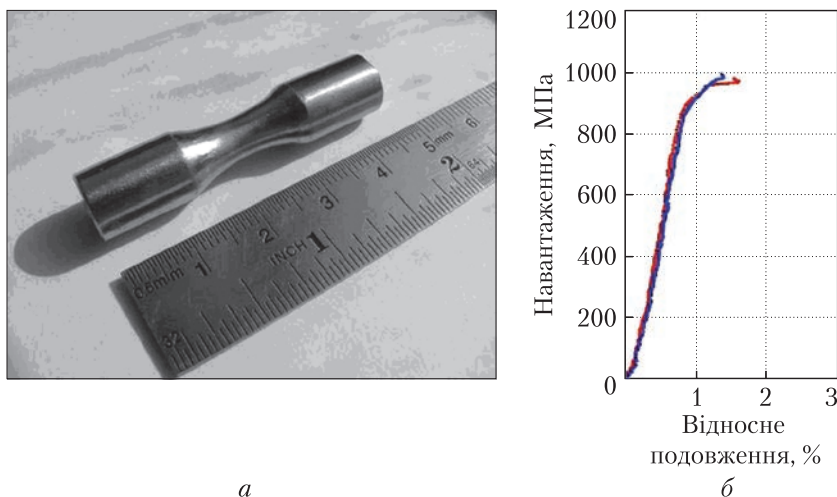
Відносне подовження  $\delta$  та відносне звуження  $\psi$  зразка після розриву, практично, відсутні.

Інтерметаліди системи TiAl при кімнатній температурі є малопластичними матеріалами і при випробуванні на одновісне розтягнення крихке руйнування зразка настає відразу в пружній області після розтягнення. Крихкі матеріали поведуться інакше, ніж пластичні. Якщо для пластичних матеріалів основним видом випробування є розтягнення, то для крихких матеріалів — стиснення. Тому багато дослідників при вирішенні матеріалознавчих проблем інтерметалідів системи TiAl, для визначення їх механічних характеристик використовують випробування на одновісне стиснення [9, 10]. В цьому випадку можна записати діаграму напруга — деформація і визначити міцність, текучість та відносне подовження, а також, порівнявши характеристики  $\sigma_T/\sigma_b$ , визначити схильність матеріалу до крихкого руйнування.

Оскільки випробування матеріалу на статичний розтяг при кімнатній температурі показали практичну відсутність ознак пластичності матеріалу, було прийнято рішення подальші випробування з метою визначення механічних характеристик проводити на стиснення.

Зразки на стиск розміром ( $\varnothing 2,5 \times 5$  мм) в вихідному стані досліджували шляхом одновісного стиску з використанням INSTRON 8802 відповідно до стандарту ASTM D695 зі швидкістю деформації  $2 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ .

В результаті проведених випробувань на стиснення зразків вихідного матеріалу була записана діаграма напруга — деформація та отримані такі дані, як межа міцності, межа теку-

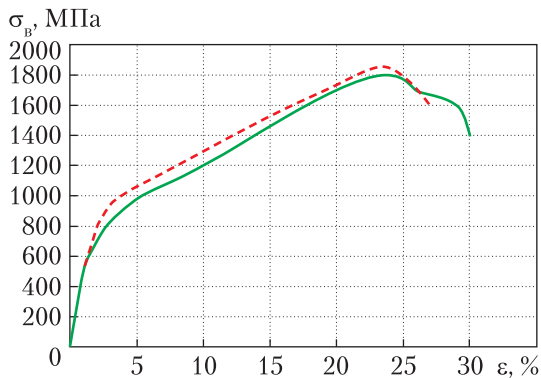


**Рис. 3.** Випробування на розтягнення зразка інтерметаліду після плавки зливка методом ІБЗП: *a* – зовнішній вигляд зразка; *б* – криві деформації на розтягнення

чості і ступінь деформації при стисненні, які дорівнюють:  $\sigma_{0,2} = 494,1$  МПа;  $\sigma_{\text{в}} = 1400,0$  МПа;  $\varepsilon = 26,4$  %. На рис. 2 наведена крива деформації при стисненні зразків вихідного матеріалу.

Межа міцності вихідного матеріалу, яка була визначена при випробуванні на розтяг, значно нижча, ніж та, яка одержана при випробуванні на стиснення. У нашому випадку межа міцності при стисненні майже у шість разів більша, ніж межа міцності на розтягнення (1400 МПа та 240,5 МПа відповідно).

**Механічні випробування інтерметаліду після перекристалізації методом індукційної зонної плавки.** Як відзначалося вище, механічні властивості сплаву безпосередньо залежать від його структурного стану. Дослідження структури сплаву після застосування процесу ІБЗП показало, що на різних ділянках зливка формується структура, яка складається з  $\gamma$ - і  $(\gamma + \alpha_2)$ -фази, а також з'являється  $\beta$ (В2)-фаза, яка розташовується по межах колоній. Крім того, спостерігається зменшення розмірів колоній  $(\gamma + \alpha_2)$ -фази і товщини ламелів [5–7]. Присутність у структурі інтерметаліду навіть незначної кількості  $\beta$ -фази сприятливо впливає на його пластичність [10].



**Рис. 4.** Криві деформації при кімнатній температурі для матеріалу після ІБЗП

Зі сплаву після зонної перекристалізації були виготовлені зразки і проведені їх випробування на розтяг.

На рис. 3, *a* проілюстровано зовнішній вигляд зразка для випробувань на розтяг, а на рис. 3, *б* наведено криві деформації на розтягнення зразків.

В результаті випробування на розтяг зразків сплаву після ІБЗП були отримані наступні результати:  $\sigma_{0,2} = 837$  МПа,  $\sigma_{\text{в}} = 983$  МПа,  $\delta = 1,45$  %.

Якщо порівняти результати випробувань на розтяг, то  $\sigma_{\text{в}}$  після обробки методом ІБЗП в по-

рівнянні з тими ж значеннями вихідного матеріалу зростає в 4 рази з 240,5 до 983 МПа. Межу текучості  $\sigma_{0,2}$  і відносне подовження при випробуванні на розтяг вихідного матеріалу визначити не вдалося, руйнування зразка відбулося відразу ж в пружній області після розтягнення, а у зразків після ІБЗП при випробуванні на розтяг вдалося визначити межу текучості та відносне подовження.

У зв'язку з тим, що основні механічні характеристики вихідного матеріалу були визначені при їх випробуванні на стиснення, для порівняння одержаних даних були проведені випробування на стиск також і для зразків після перекристалізації інтерметаліду методом ІБЗП. В результаті випробування на стиснення зразків сплаву після ІБЗП було визначено, що  $\sigma_{0,2} = 609,0$  МПа,  $\sigma_B = 1867,5$  МПа,  $\delta = 26,8$  %.

На рис. 4 представлені криві стиснення, отримані при деформації зразків.

Дослідження показали, що після зонної плавки механічні властивості значно збільшуються в порівнянні з вихідним матеріалом. При цьому межа текучості ( $\sigma_{0,2}$ ) зростає на 13 % з 494 до 547 МПа і межа міцності ( $\sigma_B$ ) ~ на 30 % з 1400 до 1800 МПа.

### Висновки

1. При випробуванні вихідного матеріалу на розтяг визначено, що пластичність інтерметаліду TiAl при кімнатній температурі (+20 °С) практично не спостерігається, а межа міцності дорівнює 240,5 МПа.

2. Зонна перекристалізація  $\beta$  стабілізованого інтерметаліду дозволила визначити пластичні властивості матеріалу – межу текучості та відносне подовження, які дорівнюють:  $\sigma_{0,2} = 837$  МПа і  $\delta = 1,45$  %.

3. В результаті перекристалізації методом індукційної безтигельної зонної плавки при випробуванні на стиснення, значно поліпшуються механічні властивості металу: межа текучості ( $\sigma_{0,2}$ ) зростає на 13 %, а межа міцності ( $\sigma_B$ ) ~ на 30 %.

4. Порівняння механічних властивостей сплаву, які одержані різними методами випробування (на розтяг та на стиснення) показало, що результати, визначені при випробуванні на стиснення майже в 6 разів вищі, ніж на розтяг.

### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Appel F., Paul J.D.H., Oering M. Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology, WILEY-VCH, Weinheim, 2011.
2. Поварова К.Б., Банных О.А. Принципы создания конструкционных сплавов на основе Принципы создания конструкционных сплавов на основе интерметаллидов. Часть I. *Материаловедение*. 1999. № 2. С. 27–32.
3. Clemens H., Mayer S. Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications – processing, microstructure and properties. *Mater. High Temp.* 2016. **33**. С. 560–570.
4. Schwaighofer E., Clemens H., Mayer S. et al. Microstructural design and mechanical properties of a cast and heat-treated intermetallic multi-phase  $\gamma$ -TiAl-based alloy. *Intermetallics*. 2014. **44**. P. 128–140.
5. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V., Statkevich I.I., Gorshenkov M.V., Korotitskiy A.V. Room-temperature tensile properties of float-zone processed  $\beta$ -stabilized  $\gamma$ -TiAl(Nb,Cr,Zr) intermetallic. *J. Mater. Lett.* 2017. **188**. P. 88–91.
6. Kartavykh A.V., Asnis E.A., Piskun N.V., et al. Microstructure and mechanical properties control of  $\gamma$ -TiAl(Nb, Cr, Zr) intermetallic alloy by induction float zone processing. *J. Alloys Compd.* 2015. **643**. P. S182-S186.
7. Kartavykh, A.V., Asnis E.A., Piskun N.V., et al. A promising microstructure/deformability adjustment of  $\beta$ -stabilized  $\gamma$ -TiAl intermetallics. *Mater. Lett.* 2016. **162**. P. 180–184.
8. ГОСТ 1497-84 ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.

9. Золоторевский В.С., Механические свойства металлов, Москва: Металлургия. 1983. 352с.
10. Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. и др. Конструкционные материалы. Справочник. Москва: Машиностроение, 1990. 688 с.

Надійшло до редакції 26.05.2020

## REFERENCES

1. Appel, F., Paul, J. D. H. & Oering, M. (2011). Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology, WILEY-VCH, Weinhei.
2. Povarova, K. B. & Bannikh, O. A. (1999). Principles of the construction of structural alloys on the basis of intermetallics (Part I). Mater. Sci., No. 3, pp. 27-33.
3. Clemens, H. & Mayer, S. (2016). Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications – processing, microstructure and properties, Mater. High Temp., 33, pp. 560-570.
4. Schwaighofer, E., Clemens, H., Mayer, S. et al. (2014). Microstructural design and mechanical properties of a cast and heat-treated intermetallic multi-phase  $\gamma$ -TiAl based alloy. Intermetallics, 44, pp. 128-140.
5. Kartavykh, A. V., Asnis, E. A., Piskun, N. V., Statkevich, I. I., Gorshenkov, M. V. & Korotitskiy, A. V. (2017). Room-temperature tensile properties of float-zone processed  $\beta$ -stabilized  $\gamma$ -TiAl(Nb,Cr,Zr) intermetallic. J. Mater. Lett., 88, pp. 88-91.
6. Kartavykh, A. V., Asnis, E. A., Piskun, N. V. et al. (2015). Microstructure and mechanical properties control of  $\gamma$ -TiAl(Nb,Cr,Zr) intermetallic alloy by induction float zone processing. J. Alloys Compd., 643, pp. S182-S186.
7. Kartavykh, A. V., Asnis, E. A., Piskun, N. V. et al. (2016). A promising microstructure/deformability adjustment of  $\beta$ -stabilized  $\gamma$ -TiAl intermetallics. Mater. Lett., 162, pp. 180-184.
8. GOST 1497-84 GOST 1497-84. Metals. Tensile Test Methods
9. Zolotarevsky, V. S. (1983). Mechanical properties of metals. Moscow: Metallurgy.
10. Arzamasov, B. N., Brostrem, V. A., Boucher, N. A. et al. (1990). Construction materials. Directory. Moscow: Mechanical Engineering.

Received 26.05.2020

*L.M. Lobanov, E.A. Asnis, N.V. Piskun, I.I. Statkevich*

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kyiv  
E-mail: asnis@paton.kiev.ua, nadamova54@gmail.com

## IMPROVEMENT OF MECHANICAL PROPERTIES OF $\beta$ -STABILIZED INTERMETALLICS OF TiAl SYSTEM BY ZONE RECRYSTALLIZATION METHOD

We investigate the mechanical properties of the intermetallic alloy of the TiAl system of the composition Ti-44Al-5Nb-3Cr-1.5Zr (at.%), which was remelted in order to optimize the structure and properties by the method of induction float zone melting (FZ-processing). The method of tensile and compressive tests of the intermetallic of the TiAl system, both in the initial state and after the crucibleless induction zone melting, has been developed. The results of tensile tests of the source material showed that the tensile strength at room temperature (+ 20 °C) is 240.5 MPa, and ductility is practically not observed. An analogous test of samples, which passed the test using the IBZP method, showed a yield limit of 837 MPa, ultimate strength of 983 MPa, and tensile elongation  $\delta$  – 1.45%.

Intermetallics of the TiAl system at room temperature are low-plasticity materials, and the brittle fracture of the sample when tested for uniaxial tension occurs immediately in the elastic region. Due to the fact that the compression is one of the mildest types of tests, it was decided to perform further tests to determine the mechanical characteristics of compression.

The studies were performed on a machine Instron 8802 using special devices designed for flat and cylindrical specimens in accordance with the standard ASTM D695.

This allowed us to determine such mechanical characteristics as the yield limit and ultimate strength, as well as the degree of deformation under the compression  $\varepsilon$  %, for the source material. Deformation curves were constructed from these data.

In order to compare the mechanical properties of the initial alloy, which were obtained by different test methods – tensile and compressive, we also tested the samples for the compression after the zone recrystallization. It is shown that the mechanical properties of the alloy, which were determined in the compression test, are much higher than those obtained in the tensile test.

**Keywords:** *intermetallic alloy, mechanical tests, ultimate strength, yield limit, elongation, tensile tests, compression tests.*