

## Температурная зависимость механических свойств сплавов на основе интерметаллида TiAl

Ю. Н. Подрезов, И. Д. Горная, М. В. Ремез, В. С. Голтвяница,  
С. К. Голтвяница

*Исследована температурная зависимость прочности и пластичности сплавов на основе интерметаллида TiAl. Изучено влияние ниобия, хрома, молибдена и некоторых РЗМ на фазовый состав, структуру и механические характеристики титан-алюминидных сплавов. Механические свойства сплавов определяли по результатам испытаний на сжатие в интервале температур от комнатной до 800 °С. Закономерности распространения трещины изучали по результатам фрактографического анализа образцов, испытанных на изгиб, и по рельефу, возникающему на боковой поверхности образца при сжатии. Показано, что сплавы, легированные ниобием в сочетании с другими полезными добавками, демонстрируют прочность свыше 1000 МПа, предел текучести — выше 700 МПа и пластичность при сжатии — больше 5% в широком диапазоне температур испытаний, что делает их перспективными для использования в качестве конструкционных материалов.*

**Ключевые слова:** легирование, предел текучести, прочность, пластичность.

### Введение

Известно, что создание двухфазной ( $\alpha_2 + \gamma$ ) ламельной структуры в сплавах на основе  $\gamma$ -TiAl способствует повышению их механических свойств. В такой структуре тонкие прослойки фазы  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al препятствуют распространению трещин, зародившихся в более хрупкой  $\gamma$ -TiAl фазе, повышая низкотемпературную пластичность и трещиностойкость. Фаза  $\gamma$ -TiAl, в свою очередь, обеспечивает работоспособность сплавов при больших нагрузках и температурах порядка 700—800 °С [1, 2]. Рациональное легирование позволяет, варьируя состав и структуру сплавов, влиять на их механические характеристики [3].

В последние годы Nb стал одной из основных легирующих добавок двухфазных  $\alpha_2 + \gamma$ -титан-алюминидных сплавов 3-го поколения [4]. Введение этого элемента в оптимальных количествах приводит к увеличению энергии активации диффузии, которая способствует измельчению структуры и повышению ее термической стабильности. В результате наблюдается одновременное увеличение как низкотемпературной пластичности, так и высокотемпературной ползучести [5—9]. Диаграммы фазовых равновесий тройной системы Ti—Al—Nb, фазовый состав соответствующих сплавов и их структура исследованы благодаря практическому интересу к таким сплавам [10—12]. Однако в литературе мало результатов систематических исследований, определяющих взаимосвязь между содержанием ниобия в двухфазных  $\alpha_2 + \gamma$ -сплавах и их физико-механическими свойствами.

© Ю. Н. Подрезов, И. Д. Горная, М. В. Ремез, В. С. Голтвяница,  
С. К. Голтвяница, 2012

Цель настоящей работы — изучить влияние легирования отдельными элементами (Al, Nb, Sc) и комплексного легирования на температурную зависимость механических свойств сплавов на основе алюминидов титана в интервале температур 20—800 °С.

### Материалы и методы эксперимента

Изучали механическое поведение трех групп литых сплавов системы Ti—Al на основе алюминидов титана (таблица).

- I. Сплавы Ti—Al с разным содержанием Al, определяющим фазовый состав сплавов —  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al,  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al +  $\gamma$ -TiAl,  $\gamma$ -TiAl (таблица, сплавы № 1—3).
- II. Сплавы  $\gamma$ -TiAl, легированные Nb (сплавы № 4—6).
- III. Комплексно-легированные  $\gamma$ -TiAl сплавы (сплавы № 7—10).

Слитки № 1—5 выплавляли по методике, описанной в работе [17], слитки № 7—9 — как в работе [13] и № 6 — как в [4]. Содержание O<sub>2</sub> во всех лигатурах не превышало 0,02—0,04% (мас.), а количество N и H было ниже порога чувствительности метода измерения.

Механические свойства сплавов исследовали при сжатии и изгибе. Испытания на сжатие проводили на прямоугольных образцах размерами 3,5×3,5×5 мм на установке У22-52 в интервале температур 20—800 °С со скоростью относительной деформации  $3 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Исследования на изгиб выполняли по трехточечной схеме нагружения на этой же установке при комнатной температуре со скоростью  $2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ .

Структуру сплавов исследовали методами оптической микроскопии (ОМ) на приборе Gemini 1550, трансмиссионной электронной микроскопии (ТЭМ) — на микроскопе JEM-100CX и сканирующей микроскопии (СЭМ) — на Superprobe-721.

### Составы исследуемых сплавов

Номер сплава	Состав		
	% (ат.)	% (мас.)	фазовый
1	Ti—31Al	Ti—20Al	$\alpha_2$
2	Ti—43Al	Ti—30Al	$\alpha_2 + \gamma$
3	Ti—50Al	Ti—36Al	$\gamma$
4	Ti—46Al—2,5Nb	Ti—31,5Al—5,9Nb	$\alpha_2 + \gamma$
5	Ti—49Al—3,7 Nb	Ti—33,6Al—8,7 Nb	$\alpha_2 + \gamma$
6	Ti—46Al—8Nb	Ti—46Al—8Nb	$\alpha_2 + \gamma$
7	Ti—48Al—4Nb—3Mo—0,2Zr—0,4Si—0,05Y—0,08Sc	Ti—31,6Al—8,8Nb—6,5Mo—0,4Zr—0,3Si—0,1Y—0,09Sc	$\alpha_2 + \gamma$
8	Ti—47Al—2,6Nb—0,6Cr—1Mo—0,3Ni—0,2Zr—0,6Si—0,1Y—0,09Sc	Ti—31,6Al—6Nb—0,8Cr—2,5Mo—0,5Ni—0,4Zr—0,4Si—0,3Y—0,1Sc	$\alpha_2 + \gamma$
9	Ti—48Al—2Nb—2Cr—0,08Sc	Ti—33,4Al—4,8Nb—2,6Cr—0,09Sc	$\alpha_2 + \gamma$
10	Ti—48Al—2Nb—2Cr	Ti—33,3Al—2,7b—4,8Cr	$\alpha_2 + \gamma$

## Результаты эксперимента и их обсуждение

### Сплавы на основе алюминидов титана

На рис. 1 представлены температурные зависимости механических свойств при сжатии сплавов № 1—3 (таблица). Согласно данным исследований авторов, структура сплавов № 1—3 состоит из  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al,  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al +  $\gamma$ -TiAl и  $\gamma$ -TiAl фаз соответственно [14].

Сплав № 1 демонстрирует небольшие изменения предела текучести в интервале температур 20—800 °С. Значения  $\sigma_{02}$  изменяются в диапазоне 600—800 МПа. Предел прочности снижается примерно от 1300 МПа при комнатной температуре до 1050 МПа при 800 °С и имеет максимум 1450 МПа при 500 °С и минимум 750 МПа при 700 °С. Пластичность с ростом температуры возрастает от нуля при 20 °С до 10% при 800 °С и тоже имеет максимум при 500 °С и небольшое падение при 700 °С.

В сплаве № 3, состоящем из  $\gamma$ -TiAl фазы, предел текучести находится на уровне 300—400 МПа во всем исследованном температурном интервале. Прочность снижается от 2500 МПа при комнатной температуре до 1350 МПа при 800 °С. Обращает на себя внимание аномально высокая скорость упрочнения сплава в интервале деформаций от 0,5% до деформации в момент разрушения. Пластичность при сжатии при 20 °С составляет около 7%, а при 800 °С — ~10% и в интервале 200—400 °С снижается до 5%. Это снижение пластичности, по-видимому, происходит вследствие наличия динамического деформационного старения во время испытаний [4, 15].

Сплав № 2 состава 57Ti—43Al с фазовой структурой  $\alpha_2 + \gamma$  имеет предел текучести немного выше, чем у сплава № 3 (только при 20 °С наблюдается более значительная разница, составляющая 200 МПа). Однако

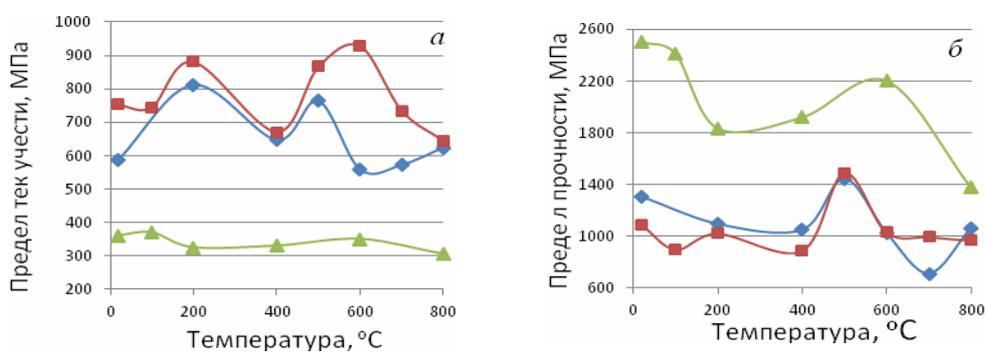
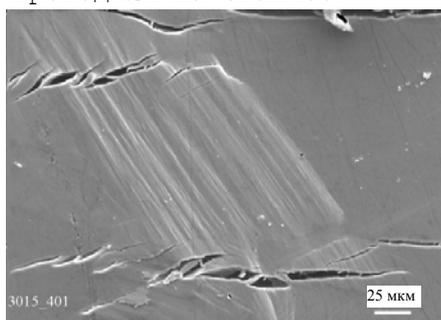
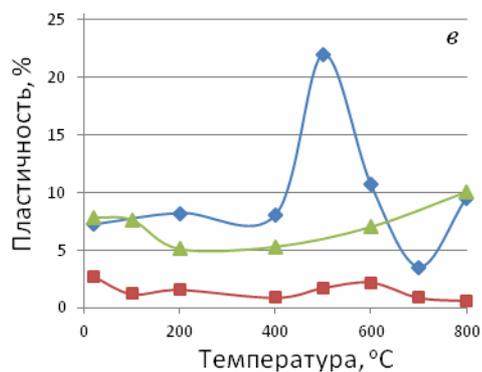


Рис. 1. Температурные зависимости пределов текучести (а) и прочности (б), пластичности (в) сплавов № 1–3 (◆, ■, ▲ соответственно). На этом рисунке и последующих нумерация сплавов соответствует данным таблицы, а испытания проводили на сжатие.



а



б

Рис. 2. Микрофотографии поверхности сплавов № 1 ( $\epsilon = 5\%$ ) и 3 ( $\epsilon = 3\%$ ) после испытания на сжатие при 20 °С (ОМ).

он обладает повышенной хрупкостью: его пластичность составляет от нуля до 3% во всем интервале температур.

Следует обратить внимание на то, что зарождение трещины в сплаве № 3 и его разрушение существенно отличаются от таковых в сплаве № 1. Об этом свидетельствуют фотографии боковых поверхностей образцов после деформирования при сжатии (рис. 2). Видно, что при деформации в сплаве № 1 формируется сеть микротрещин, соединенных перемычками. В сплаве № 3 зарождается очень мало трещин и разрушение происходит без стадии их подрастания, практически, от первого дефекта критического размера.

*Титан-алюминидные сплавы, легированные ниобием  
в области твердого раствора*

Результаты механических испытаний сплавов № 4—6 представлены на рис. 3. Для сравнения приведены зависимости свойств сплава № 3. На графиках видно, что все сплавы имеют высокую жаропрочность.

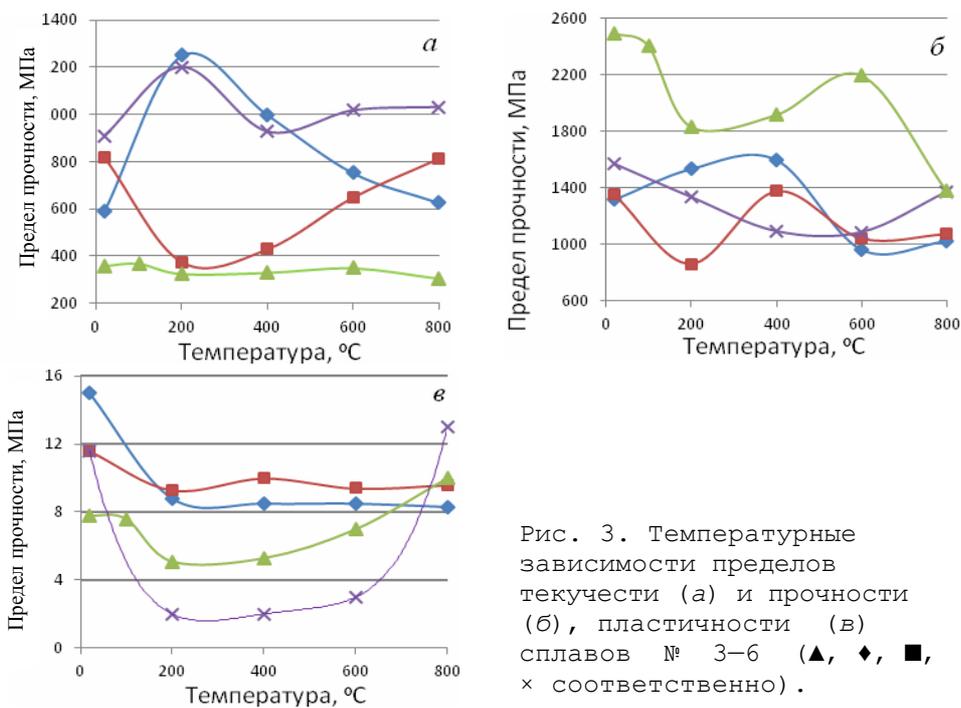


Рис. 3. Температурные зависимости пределов текучести (а) и прочности (б), пластичности (в) сплавов № 3–6 (▲, ◆, ■, × соответственно).

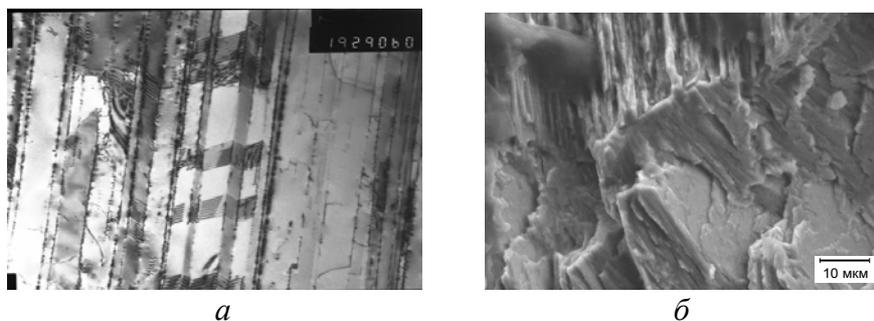


Рис. 4. Результаты микроструктурного анализа сплава № 6: а — ТЭМ; б — СЭМ.

Максимальные значения предела текучести во всем температурном интервале имеет сплав № 6 (Ti—46Al—8Nb) — 900—1200 МПа. Однако этот сплав обладает более низкой пластичностью (около 2%) в интервале 200—600 °С, чем другие сплавы. Для сплава № 5 (Ti—49Al—3,7Nb) при комнатной температуре и при 800 °С предел текучести составляет 800 МПа. В интервале между этими температурами  $\sigma_{02}$  понижается и при 200 °С составляет около 400 МПа. Предел прочности сплава № 5 в исследованном температурном интервале — 850—1400 МПа, пластичность — 9,5—12%. Образец состава № 4 (Ti—46Al—2,5Nb) при комнатной температуре и при 800 °С обладает пределом текучести на уровне 600 МПа, в интервале 200—600 °С — от 1250 до 750 МПа. Предел прочности находится на уровне 1000—1600 МПа и сплав обладает хорошей пластичностью — 9—15%.

Из сравнения температурных зависимостей механических характеристик нелегированного сплава интерметаллидного состава Ti—50Al (сплав № 3) и легированных следует, что добавки ниобия значительно

повышают предел текучести и несколько увеличивают пластичность сплавов. Такое изменение может быть следствием того, что Nb, находясь в виде твердого раствора в  $\gamma$ -фазе, повышает склонность к двойникованию [16]. Микроструктурный анализ сплава № 6 (рис. 4, а) показал существование двойников на границе между  $\gamma$ - и  $\alpha_2$ -фазами. Зародившиеся на межфазной границе двойники распространяются в основном в  $\gamma$ -фазу, как менее твердую (прочную). Поверхность излома (рис. 4, б) — слоистая, что указывает на торможение трещин границами ламелей.

*Сложнолегированные титан-алюминидные сплавы, содержащие ниобий*

Для дальнейшей оптимизации свойств сплавов на основе интерметаллида TiAl, легированного ниобием, были созданы сложнолегированные сплавы с добавками элементов, положительно влияющими на прочность и пластичность этого интерметаллида [17]. В таблице эти сплавы имеют нумерацию № 7—10. На рис. 5 приведены температурные зависимости их пределов текучести, прочности и пластичности.

Сплав № 7 имеет высокие значения предела текучести на уровне 700—900 МПа во всем температурном интервале. Предел прочности снижается с ростом температуры от 2000 МПа при комнатной температуре до 1100 МПа при 800 °С. Пластичность при сжатии при комнатной температуре и при 800 °С — 18%, но в интервале 200—400 °С происходит существенное снижение до 4%.

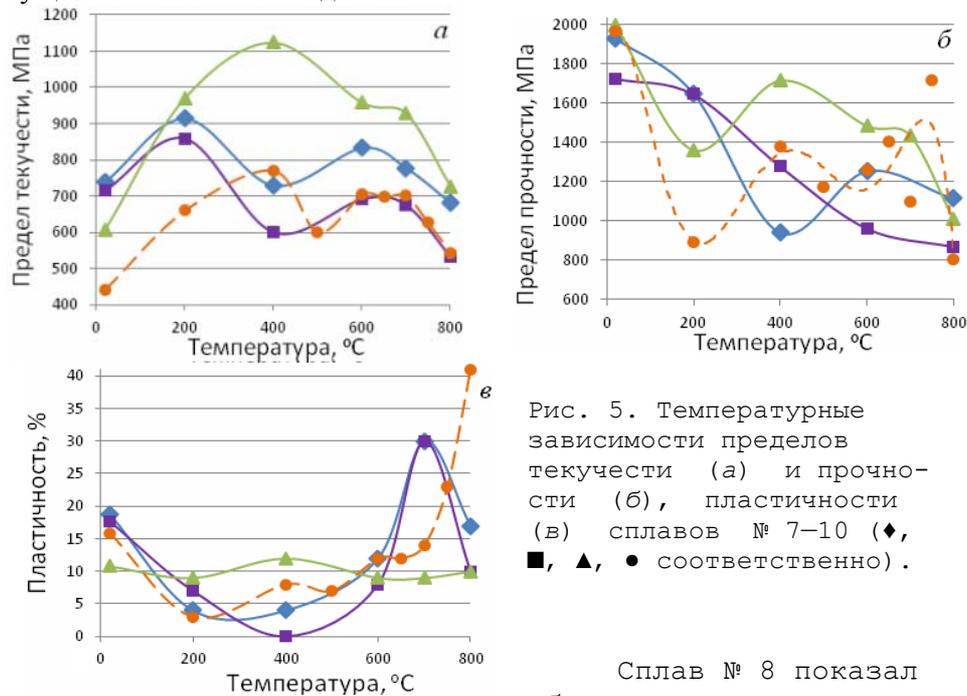


Рис. 5. Температурные зависимости пределов текучести (а) и прочности (б), пластичности (в) сплавов № 7–10 (♦, ■, ▲, ● соответственно).

Сплав № 8 показал небольшое снижение предела текучести с ростом температуры по сравнению с предыдущим сплавом, более

монотонную кривую предела прочности (постепенное снижение от 1750 до 850 МПа). Изменение пластичности с повышением температуры также

демонстрирует минимум, однако при 400 °С она снижается до нуля.

Сложнолегированный сплав № 9 создан на базе классического сплава Ti—48Al—2Nb—2Cr [18] (№ 10, таблица) с небольшой добавкой скандия. Как видно, легирование 0,08% (ат.) Sc примерно на 150 МПа увеличивает предел текучести при комнатной и при температуре 800 °С, а в промежуточном интервале разница составляет до 350 МПа. Так,  $\sigma_{02}$  этого сплава при 20 °С составляет 600 МПа, при 800 °С — 710 МПа и температурная зависимость имеет максимум 1120 МПа при 400 °С. Пластичность этого сплава во всем температурном интервале — 9—12%, предел прочности при комнатной температуре — 2000 МПа. При дальнейшем повышении температуры прочность остается высокой — от 1700 до 1400 МПа при 700 °С, а уже при 800 °С происходит разупрочнение до 1000 МПа.

Таким образом, исследованные нами сплавы на основе интерметаллида TiAl, легированные ниобием и другими примесями, сочетают высокую жаропрочность при 800 °С на уровне 600—1000 МПа с удовлетворительной пластичностью при комнатной температуре и могут служить основой для дальнейшей разработки промышленных материалов этого класса.

### Выводы

Сплав состава Ti—46Al—2,5Nb показал высокие прочностные свойства наряду с достаточно высокой для этого класса материалов пластичностью (более 8%). Сплав Ti—46Al—8Nb, имея лучшие характеристики прочности ( $\sigma_{02}$  — >900 МПа), в интервале температур 200—600 °С продемонстрировал пластичность около 2%.

Среди сложнолегированных сплавов при комнатной температуре и при 800 °С высокие значения механических характеристик имеет сплав состава Ti—48Al—4Nb—3Mo—0,2Zr—0,4Si—0,05Y—0,08Sc ( $\sigma_{02}$  = ~700 МПа,  $\delta$  = ~18%). В интервале 200—600 °С наблюдаются незначительные снижения прочностных свойств, однако понижение пластичности существенное, до 4%. Сплав состава Ti—48Al—2Nb—2Cr—0,08Sc обладает высокими пределами текучести и прочности и пластичностью на уровне 10% во всем исследованном температурном интервале, демонстрируя наиболее оптимальное сочетание механических свойств.

1. Appel F., Oehring M., Wagner R. Novel design concepts for gamma-base titanium aluminide alloys // *Intermetallics*. — 2000. — **8**. — P. 1283—1312.
2. Kumar S. K., Onstott J., Chan K. S. The fracture resistance of a binary TiAl Alloy // *Metall. Mater. Trans. A*. — 2000. — **31A**. — P. 71—80.
3. Горная И. Д., Баньковский О. И., Евич Я. И. и др. Влияние легирования и микролегирования на структуру и свойства литых  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al /  $\gamma$ -TiAl сплавов // Тез. докл. Междунар. конф. “HighMatTech” (3—7 октября 2011 г., Киев, Украина). — С. 198.
4. Подрезов Ю. М., Бондар. А. А., Вітусевич В. Т., Ремез М. В. та ін. Структура та властивості титан-алюмінідних сплавів, легованих ніобієм і танталом // Порошковая металлургия. — 2011. — № 7/8. — С. 25—46.
5. Имаев Р. М., Хизматуллин Т. Г., Оеринг М., Анпель Ф. Новые подходы к разработке сплавов на основе фаз  $\gamma$ -TiAl +  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>Al // Физика металлов и металловедение. — 2006. — **102**, № 1. — С. 114—122.
6. He X., Yu Z., Lin G. et al. Mathematical modeling for high temperature flow behavior of as-cast Ti—45Al—8,5Nb—(W, B, Y) alloy // *Mater. Design*. — 2009. — **30**. — P. 166—169.

7. *Bystrzanowski S., Bartels A., Stark A. et al.* Evolution of microstructure and texture in Ti—46Al—9Nb sheet material during tensile flow at elevated temperatures // *Intermetallics*. — 2010. — **18**. — P. 1046—1055.
8. *Planck S. K., Rosenberger A. H.* The influence of high temperature exposure on the mechanical performance of a  $\gamma$ -titanium aluminide alloy // *Mater. Sci. Eng. A*. — 2002. — **A325**. — P. 270—280.
9. *Bystrzanowski S., Bartels A., Clemens H., Gerling R.* Characteristics of the tensile flow behavior of Ti—46Al—9Nb sheet material. Analysis of thermally activated processes of plastic deformation // *Intermetallics*. — 2008. — **16**. — P. 717—726.
10. *Raghvan V.* Al—Nb—Ti (Aluminum-Niobium-Titanium) // *J. Phase Equilib. Diff.* — 2005. — **26**, No. 6. — P. 360—368.
11. *Tretyachenko L. O.* Aluminium-niobium-titanium // *Landolt-Börnstein, Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology (New Series). Group IV: Physical Chemistry. — Ternary Alloy Systems. Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data Critically Evaluated by MSIT*. — Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. — **11A3**. — P. 334—379.
12. *Witusiewicz V. T., Bondar A. A., Hecht U., Velikanova T. Ya.* The Al—B—Nb—Ti system. IV. Experimental study and thermodynamic reevaluation of the binary Al—Nb and ternary Al—Nb—Ti systems // *J. Alloys Comp.* — 2009. — **472**, No. 1—2. — P. 133—161.
13. *Фірстов С. О., Горна І. Д., Порядченко Н. Ю. та ін.* Високотемпературні властивості комплексно-легованих сплавів на основі алюмінідів титану // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. — 2010. — **1**, спец. вип. № 8. — С. 145—150.
14. *Горная И. Д., Порядченко Н. Е., Баньковский О. И. и др.* Структура и высокотемпературные свойства сплавов на основе алюминидов титана, дополнительно легированных Sc, В и РЗМ // *Тез. докл. Междунар. конф. "HighMatTech" (19—23 октября 2009 г., Киев, Украина)*. — С. 1301.
15. *Van den Beuken A.* Theory of the effect of dynamic strain ageing on mechanical properties // *Phys. Stat. Sol. (a)*. — 1975. — No. 30. — P. 197.
16. *Maloy S. A., Maloy S. A., Gray G. T.* High strain rate deformation of Ti48Al2Nb2Cr // *Acta Mater.* — 1996. — **44**, Issue 5. — P. 1741—1756.
17. *Горная И. Д., Порядченко Н. Е., Евич Я. И. и др.* Влияние легирования на высокотемпературные свойства  $\gamma$ -TiAl сплавов // *Тез. докл. VI Междунар. конф. "Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий"* (20—24 сентября 2010 г., Ялта, Украина). — С. 292.
18. *Hofmann U., Blum W.* Kinetics of high temperature deformation of lamellar Ti—48Al—2Nb—2Cr // *Intermetallics*. — 1999. — **7**, Issue 3—4. — P. 363—369.

### **Температурна залежність механічних властивостей сплавів на основі інтерметаліду TiAl**

Ю. М. Подрезов, І. Д. Горна, М. В. Ремез, В. С. Голтвяниця,  
С. К. Голтвяниця

*Досліджено температурну залежність міцності та пластичності сплавів на основі інтерметаліду TiAl. Вивчено вплив ніобію, хрому, молибдену та деяких РЗМ на фазовий склад, структуру та механічні характеристики титан-алюмінідних сплавів. Механічні властивості сплавів визначали за результатами випробувань на стиснення в інтервалі температур від кімнатної до 800 °С. Закономірності поширення тріщини вивчали за результатами фрактографічного аналізу зразків, випробуваних на згин, і за рельєфом, що виникає на боковій поверхні зразка при стисненні. Показано, що сплави, леговані ніобієм у поєднанні з іншими корисними добавками, демонструють міцність понад 1000 МПа, границю плинності вищу*

за 700 МПа та пластичність при стисненні >5% у широкому діапазоні температур випробувань, що робить їх перспективними для використання в якості конструкційних матеріалів.

**Ключові слова:** легування, границя плинності, міцність, пластичність.

### **Temperature dependence of mechanical properties of alloys on the basis of intermetallic TiAl**

Yu. M. Podrezov, I. D. Gorna, M. V. Remez, V. S. Goltvjanitsa,  
S. K. Goltvjanitsa

*Temperature dependence of strength and plasticity of alloys based on intermetallic TiAl has been investigated. The effect of niobium, chrome, molybdenum and some REM on phase composition, structure and mechanical characteristics of alloys based on titanium aluminides is described in this paper. Mechanical properties of alloys were determined by compression tests in the interval of temperatures from RT to 800 °C. Conformities to law of distribution of cracks were studied based on the results of fractography analyses of the samples, previously tested in bending; and based on surface relief analysis of compressed samples, one side of which was polished before compression. It is shown that the alloys alloyed by niobium in combination with other useful additions demonstrate strength above 1000 MPa, yield stress greater than 700 MPa and plasticity on a compression higher than 5% over a wide temperature range of tests, which makes them promising for use as structural materials.*

**Keywords:** alloying, yield stress, strength, plasticity.