

УДК 531.7; 538.9

## ОПІР ПОВЗУЧОСТІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ Ti–Al–Si–X ЗА КОРОТКОТРИВАЛИХ ВИПРОБУВАНЬ ЗГИНОМ

Д. Г. ВЕРБИЛО, М. М. КУЗЬМЕНКО, В. І. ДАНИЛЕНКО,  
Ю. М. ПОДРЕЗОВ, Л. Д. КУЛАК, С. О. ФІРСТОВ

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ*

Досліджено опір високотемпературній (650°C) повзучості відомого сплаву BT25Y та експериментального ЖТ19 системи Ti–Al–Si–X (X – Zr, Mo, Nb, Sn) за короткотривалих (упродовж 3 h) випробувань згином призматичних зразків. Запропоновано відповідні характеристики опору повзучості матеріалів, за якими сплав ЖТ19 переважає сплав BT25Y.

**Ключові слова:** *титанові сплави, високі температури, повзучість, короткотривалі випробування, згин.*

High-temperature (650°C) creep resistance of the known BT25Y alloy and experimental ЖТ19 alloy of the Ti–Al–Si–X (X = Zr, Mo, Nb, Sn) system under short-term (within 3 h) bending tests of prismatic samples was studied. The corresponding characteristics of materials creep resistance are proposed according to which ЖТ19 alloy prevails BT25Y alloy.

**Keywords:** *titanium alloys, high temperatures, creep, short-term tests, bending.*

**Вступ.** Аерокосмічна та авіаційна техніка потребує нових матеріалів із низькою питомою вагою, які зможуть замінити традиційні жароміцні сплави на основі нікелю, кобальту та заліза. Сучасні титанові сплави переважають їх за питомою міцністю при помірних (300...500°C) температурах, але із їх підвищенням механічні характеристики цих матеріалів починають суттєво знижуватись. Робочі температури найкращих промислових титанових сплавів (BT25Y, BT18Y, IM1834, Ti1100) не перевищують 600°C, що значно обмежує галузі їх використання. Для авіаційної промисловості необхідні нові жароміцні титанові сплави, здатні працювати при температурах хоча би 650...700°C, оскільки з підвищенням робочої температури на 50°C помітно росте потужність газотурбінних двигунів (ГТД). Вони повинні забезпечувати достатні параметри жароміцності і опору повзучості для зниження ваги деталей у сучасних конструкціях ГТД. Сплави на основі інтерметалідів титану  $\gamma$ -TiAl суттєво переважають кращі на сьогодні титанові за жароміцністю при температурах вище 600°C, однак, через недостатню пластичність та крихкість за помірних температур їх практичне використання обмежене. Відносно високою залишається і ціна виробів з них [1].

Упродовж останніх двадцяти років працюють над створенням нового класу композиційних титанових сплавів на базі системи Ti–Al–Si–Zr [2–7], головною відмінністю яких є достатньо високий проти традиційних вміст кремнію за його оптимального співвідношення з вмістом алюмінію. Кремній тут знаходиться у твердому розчині та включеннях силіцидів, і відбувається додаткове дисперсійне зміцнення тугоплавкою сполукою  $Ti_5Si_3$ . Такі сплави перспективні в конструкціях ГТД. Виконують дослідження з додаткового легування сплавів цієї системи Sn, Ta, Mo, V, W, які забезпечують стійкість матриці за довготривалого впливу температур до 650°C [8].

*Контактна особа:* Д. Г. ВЕРБИЛО, e-mail: ver@ipms.kiev.ua

Результати вивчення жаротривкості засвідчили їх перевагу над вживаними промисловими титановими сплавами, зокрема, над сплавом Ti6242. Механізм окиснення сплавів системи Ti–Si однаковий до 800°C, а традиційних жароміцних із  $\alpha$ -титановою матрицею змінюється уже при 620°C [9]. Отримали [2–4, 6, 10] високу міцність сплавів досліджуваної системи за температур до 700°C. Побудували (рис. 1) температурну залежність питомої міцності  $\eta = \sigma_{YS} / \rho$ , де  $\sigma_{YS}$  – границя плинності, МПа;  $\rho$  – густина,  $\text{g/cm}^3$ , для різних титанових сплавів, у тому числі на основі  $\gamma$ -TiAl [11]. Виявили, що короткочасова міцність сплавів системи Ti–Al–Si–X та інтерметалідів титану близька аж до температур 700°C.

Рис. 1. Температурна залежність питомої міцності відомих титанових сплавів [11] TNB (крива 1); TNM (зона 2); IMI 834 (крива 3); René 95 (крива 4); IN 718 (крива 5); Ti–48,5Al–2Cr–0,2C (крива 6); Ti–47Al–2Cr–0,2Si (крива 7); IN 713LC (лінія 8), а також експериментальних системи Ti–Al–Si–X (зона 9) [2–4, 6, 10].

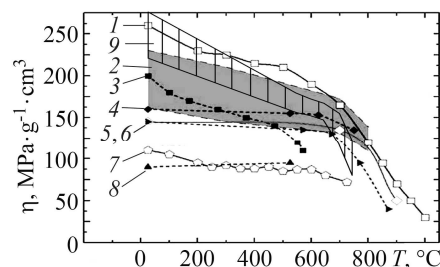


Fig. 1. Temperature dependence of specific strength of known titanium alloys [11] TNB (curve 1); TNM (zone 2); IMI 834 (curve 3); René 95 (curve 4); IN 718 (curve 5); Ti–48.5Al–2Cr–0.2C (curve 6); Ti–47Al–2Cr–0.2Si (curve 7); IN 713LC (line 8), as well as of the Ti–Al–Si–X experimental alloys (zone 9) [2–4, 6, 10].

Однак характеристики короткочасової міцності не є визначальними для вибору сплавів, здатних функціонувати за високих температур. Тут одними із основних параметрів є їх довготривала міцність та повзучість. Такі випробування доволі затратні, тому, вибираючи перспективні композиції для оцінювання високотемпературної повзучості, слід застосовувати експрес-метод. Найчастіше під час таких випробувань зразки розтягують, але відомі також дослідження, де їх згинають [12, 13].

Нижче порівняно опір високотемпературній повзучості за короткотривалих випробувань згином зразків експериментального сплаву системи Ti–Al–Si–X і відомого VT25У.

**Матеріал і методика.** Досліджували сплав ЖТ19 системи Ti–Al–Si–X, де X – Zr, Mo, Nb, Sn (табл. 1). Сплав VT25У відрізняється зниженим вмістом кремнію за відсутності легування ніобієм. Використовуючи електронно-променеве плавлення, отримали виливки сплаву ЖТ19 діаметром 110 mm, завдовжки 300 mm, які гомогенізаційно відпалювали при 1050°C упродовж 2 h. Після механічної обробки виливки багатостадійно деформували вальцюванням при 1080...1120°C. Отримали смуги поперечного перерізу 32×13 mm завдовжки 2 m, із яких виготовляли зразки для досліджень у двох структурних станах: після деформації (вихідний стан) та після деформації і термічної обробки (двостадійний відпал при 1050°C упродовж 1 h та при 700°C упродовж 3 h). Сплав VT25У вивчали у стані постачання (відпалений вальцьований лист).

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних сплавів

Сплав	Легувальні елементи, wt.%						
	Al	Si	Zr	Mo	Nb	Sn	Ti
ЖТ19	6,6	1	2,5	1	1	2,1	Решта
VT25У	6,5	0,2	3,7	4	–	1,7	–

Зразки розмірами 2,4×4×50 mm та шорсткістю поверхні після шліфування Rz 1,25 навантажували за схемою триточкового згину на базі 40 mm. Регулювали постійне в часі навантаження різними тягарями, що забезпечувало початкові мак-

симальні напруження  $\sigma = 324; 450$  і  $600$  МПа. Випробовували при  $650^\circ\text{C}$ , а прогин зразків вимірювали давачем лінійних переміщень “Microtech” з похибкою  $\pm 0,5$   $\mu\text{m}$ . Встановили [14], що випробування згином за підвищених температур мають певні переваги проти випроб розтягом: за певної деформації прогин тонкої і довгої балки перевищує у 4 рази видовження зразка за розтягу. Це спрощує методику і підвищує точність вимірювання деформації за повзучості. При цьому варто зауважити, що низка деталей ГТД, зокрема, лопатки компресора високого тиску, деформуються за згину.

**Результати та їх обговорення.** Крива повзучості при  $650^\circ\text{C}$  за початкового напруження  $600$  МПа для сплаву ВТ25У виявилась повною, тобто мала три стадії (рис. 2) вже після 12 min навантаження, що відповідає традиційним кривим [15] і підтверджує достовірність вибраної методики. Водночас криві для сплаву ЖТ19 навіть після 3 h навантаження ще відповідають другій стадії сталої повзучості (рис. 2а), що свідчить про порівняно високий опір повзучості, який помітно зростає після двостадійного відпалу термодіформованого сплаву.

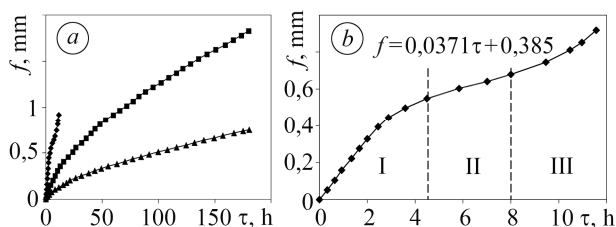


Рис. 2. Криві повзучості при  $650^\circ\text{C}$  за початкового напруження  $600$  МПа для сплавів ВТ25У (◆) та ЖТ19 у вихідному стані (■) і після відпалу (▲).

Fig. 2. Creep curves at  $650^\circ\text{C}$  for initial stress  $600$  МПа for ВТ25У and ЖТ19 alloys (◆) in the initial state (■) and after annealing (▲).

**Таблиця 2. Характеристики повзучості сплавів ЖТ19 і ВТ25У за випробування згином при  $650^\circ\text{C}$  і початкового напруження  $600$  МПа**

Сплав	$\dot{f}$ , $\mu\text{m}/\text{min}$	$f_3$ , mm
ЖТ19-1 (вихідний)	6,8	1,83
ЖТ19-1 (ГО)	3,1	0,75
ВТ25У	37,1	–

Використовуючи отримані результати (рис. 2), оптимальні варіанти експериментальних сплавів з підвищеним опором високотемпературній повзучості можна заздалегідь вибирати за двома характеристиками, встановленими після короткотривалих випробувань згином:  $\dot{f}$  – швидкістю зміни прогину (деформації повзучості) зразка вздовж осі навантаження на стадії усталеної повзучості;  $f_3$  – прогин після 3 h випробування при заданій температурі. Оптимальним буде матеріал з найнижчими значеннями  $\dot{f}$  і  $f_3$ , при цьому перевагу має параметр  $\dot{f}$ , оскільки характеризує повзучість матеріалу за триваліших випробувань. За цими параметрами сплав ЖТ19 значно переважає відомий ВТ25У (табл. 2).

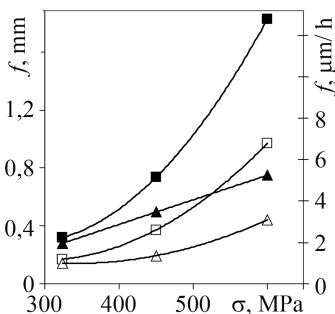


Рис. 3. Вплив початкового напруження  $\sigma$  на характеристики опору повзучості при  $650^\circ\text{C}$  сплаву ЖТ19: □, Δ –  $\dot{f}$ ; ■, ▲ –  $f_3$ ; □, ■ – вихідний стан; Δ, ▲ – після відпалу.

Fig. 3. Influence of initial stress  $\sigma$  on creep resistance characteristics of ЖТ19 alloy at  $650^\circ\text{C}$ : □, Δ –  $\dot{f}$ ; ■, ▲ –  $f_3$ ; □, ■ – initial state; Δ, ▲ – after annealing.

Встановили, що запропоновані характеристики опору високотемпературній повзучості сплаву ЖТ19 залежать від початкових напружень  $\sigma$  (рис. 3): суттєво зростають (опір повзучості зменшується) з їх підвищенням, особливо для вихідного стану, коли ці залежності параболічні. Двостадійний відпал позитивно впливає на опір повзучості, при цьому при  $\sigma = 324$  МПа повзучість слабо залежить від режиму оброблення матеріалу.

### ВИСНОВКИ

Виявлено, що опір високотемпературній повзучості конструкційних матеріалів можна достовірно оцінювати за результатами короткотривалих випробувань призматичних зразків за згину постійним навантаженням за швидкістю зміни прогину вздовж осі навантаження на стадії усталеної повзучості зразка та його значенням після 3 h навантаження. За цими параметрами експериментальний сплав ЖТ19 при 650°C значно переважає відомий ВТ25У і його опір повзучості помітно зростає, особливо за високого рівня навантаження, після термодформацийного оброблення і двостадійного відпалу.

1. *Dimiduk D. M.* Gamma titanium aluminide alloys – an assessment within the competition of aerospace structural materials // *Mater. Sci. and Eng.* – 1999. – **A263**. – P. 281–288.
2. *Alloys of the Ti–Al–Zr–Si System Intended for Operation at High Temperatures* / S. A. Firstov, L. D. Kulak, M. M. Kuz'menko, and O. M. Shevchenko // *Materials Science.* – 2019. – **54**, № 6. – P. 783–788).
3. *Фирстов С. А., Ткаченко С. В., Кузьменко Н. Н.* Титановые “чугуны” и титановые “стали” // *Металловедение и терм. обработка металлов.* – 2009. – № 1. – С. 14–20.
4. *Hot forming behaviour of Ti–Al–Zr–Si “in-situ” metal matrix composite by means of hot torsion tests* / P. Cavaliere, M. El. Mehtedi, E. Evangelista, N. Kuzmenko, and O. Vasylyev // *Composites Part A: Appl. Sci. and Manufacturing.* – 2006. – **37**, № 10. – P. 1514–1520.
5. *Kuz'menko M. M.* Structure and mechanical properties of cast Ti–Si alloys // *Materials Science.* – 2008. – **44**, № 1. – P. 49–53.
6. *Effect of plastic deformation on mechanical properties of eutectic alloys of the Ti–Al–Si–Zr system* / S. A. Firstov, Y. N. Podrezov, M. M. Kuz'menko, N. I. Danilenko, M. P. Brodnikovs'kyi, and L. D. Kulak // *Phys. Techniq. High Pres.* – 2002. – № 3. – P. 48–56.
7. *Особенности структурообразования и механические свойства деформированного титана* / Е. М. Борисовская, Д. Г. Вербило, В. А. Писаренко, Ю. Н. Подрезов, В. А. Назаренко, Я. И. Евич, В. И. Копылов // *Физика и техника высоких давлений.* – 2007. – **17**, № 2. – С. 110–118.
8. *Tensile behavior at 700°C in Ti–Al–Sn–Zr–Mo–Nb–W–Si alloy with a bi-modal microstructure* / W. J. Zhang, X. Y. Song, S. X. Hui, W. J. Ye, Y. L. Wang, and W. Q. Wang // *Mater. Sci. and Eng.: A.* – 2014. – № 595. – P. 159–164.
9. *High-temperature strength of titanium alloys alloyed with silicon, aluminum, and zirconium in air* / N. Yu. Poryadchenko, M. M. Kuz'menko, I. V. Oryshych, N. D. Khmelyuk, L. D. Kulak, and L. O. Kalashnikova // *Materials Science.* – 2005. – **41**, № 2. – P. 230–236.
10. *Influence of the structure on the high-temperature cyclic crack resistance of Ti–8Al–1.4Si–2.2Zr alloy* / O. P. Ostash, A. D. Ivasyshyn, L. D. Kulak, and M. M. Kuz'menko // *Materials Science.* – 2008. – **44**, № 3. – P. 360–367.
11. *Mayer S., Kastnerhuber M., and Clemens H.* Advanced Titanium Aluminides – How to Improve the Creep Resistance via Compositional and Microstructural Optimization // *Materials Science Forum.* – 2018. – **941**. – P. 1484–1489.
12. *Лепин Г. Ф. Бондаренко Ю. Д.* Ползучесть прямого бруса при изгибе с учетом повреждаемости материала // *Проблемы прочности.* – 1970. – № 7. – С. 68–70.
13. *Розенберг В. М.* Основы жаропрочности металлических материалов. – М.: Металлургия, 1973. – 328 с.
14. *Експрес-метод дослідження високотемпературних властивостей титанових сплавів* / Ю. М. Подрезов, Д. Г. Вербило, В. І. Даниленко, П. М. Романко, Б. В. Шуригін // *Электронная микроскопия и прочность материалов.* – 2018. – № 24. – С. 57–74.
15. *Пуарье Ж. П.* Ползучесть кристаллов. – М.: Мир, 1988. – 288 с.

Одержано 28.05.2021