

УДК 629.7.083

<sup>1</sup>Б.А. Ляшенко, д-р техн. наук  
<sup>2</sup>В.В. Щепетов, д-р техн. наук  
<sup>3</sup>В.І. Мирненко, канд. техн. наук  
<sup>4</sup>А.В. Рутковський, канд. техн. наук

## ТЕРМОМЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT20 З ВАКУУМ-ПЛАЗМОВИМИ ПОКРИТТЯМИ

<sup>1,4</sup>Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, e-mail: coating@ipp.adam.kiev.ua  
<sup>2</sup>Аерокосмічний інститут НАУ, e-mail: aki@nau.edu.ua  
<sup>3</sup>Національна академія оборони України, e-mail: diskret@inbox.ru

*Наведено результати експериментальних досліджень на ізотермічну та термоциклічну повзучість титанового сплаву VT20 з вакуум-плазмовими покриттями TiN, (TiAl)N та (TiC)N в інтервалі температур 350–640 °С при дії статичного навантаження 0,8 $\sigma_s$ . Установлено зниження ізотермічної та термоциклічної повзучості титанового сплаву VT20 з вакуум-плазмовими покриттями.*

### Вступ

Титанові сплави в порівнянні з іншими конструкційними авіаційними матеріалами мають кращі співвідношення високих механічних властивостей, корозійної стійкості та малу питому вагу. Деталі з них значно, а в агресивних умовах у декілька разів перевищують за цими показниками аналогічні вироби та деталі, що виготовлені з дефіцитних дорогих нержавіючих сталей [1].

### Постановка проблеми

Титанові сплави в процесі нагрівання отримують необоротні структурні перетворення: різко зростає зерно, змінюється форма виділення фаз. У зв'язку зі структурними перетвореннями знижуються механічні властивості, особливо характеристики пластичності [2]. При підвищених температурах опір деформації титанових сплавів стрибком зменшується майже в три рази [3]. Крім того, підвищення робочих температур титанових сплавів обмежується окисненням на велику глибину, у результаті чого втрачається пластичність і збільшується поверхнева твердість [4]. З цих причин титанові сплави не можуть відноситися до жароміцних матеріалів, що стримує їх широке застосування, особливо в авіаційній і космічній техніці, при тривалій дії підвищених температур.

### Аналіз останніх досліджень

Підвищення термомеханічних властивостей титанових сплавів, що працюють у діапазоні температур від 350 до 640 °С, досягається за рахунок використання перспективних технологічних процесів обробки поверхні конструкційних елементів на етапах розробки і виробництва авіаційної техніки [1; 4]. Великої уваги заслуговує метод вакуум-плазмового нанесення (PVD – фізичне осадження з парогазової фази) захисних зміцнювальних покриттів на титанові сплави [5], але дослідження їх впливу на ізотермічну та термоциклічну повзучість при температурах до 640 °С не проводилось.

**Метою** статті є дослідження термомеханічних властивостей (ізотермічної та термоциклічної повзучості) титанового сплаву VT20 з вакуум-плазмовими покриттями TiN, (TiAl)N та (TiC)N у діапазоні температур від 350 до 640 °С.

### Результати досліджень

Багатошарові вакуум-плазмові покриття TiN, (TiAl)N та (TiC)N товщиною 2...10·10<sup>-6</sup> м наносилися на плоскі стандартні зразки (ДСТУ 2637-94), що виготовлені з титанового сплаву VT20, на модернізованій установці ННВ-6,6-ІІ типу “Булат” з одночасним розпиленням матеріалів із двох катодів (мішеней). Технологічний процес нанесення покриттів складався з трьох етапів:

- іонної очистки поверхні при температурі 500–550 °С протягом 360–1080 с;
- плазмохімічного синтезу матеріалу, що випаровується, у камері та на поверхні;
- конденсації покриття на деталі при температурі 420–500 °С протягом 720–3600 с.

Шорсткість поверхні титанового сплаву VT20 з покриттями TiN, (TiAl)N та (TiC)N визначали за допомогою профілографа-профілометра 201, мікротвердість системи “основа–покриття” – за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3. Результати досліджень подані в таблиці.

Результати досліджень титанового сплаву  
PVD-покриттями

Показник властивості	Сплав без покриття	Тип покриття		
		TiN	(TiAl)N	(TiC)N
Шорсткість $R_a$	0,68	0,30	0,28	0,37
Мікротвердість $H_{uz}$ , МПа	4650	9680	19844	10376

Повзучість при постійному статичному навантаженні є чутливим інструментом для фіксації зміни стану як покриття, так і поверхні розділу “основа–покриття”.

Порівняльні випробування зразків з титанового сплаву VT20 із PVD-покриттями на ізотерміч-

ну і термоциклічну повзучість проводили при статичному навантаженні  $0,8\sigma_y$  в інтервалі температур від 350 до 640 °С на універсальній установці “Щелкунчик” (Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України) в умовах осьового розтягу при нагріванні робочої ділянки зразка шляхом фокусування променевої енергії в замкнутій оптичній безінерційній системі. Завдяки цьому зразок нагрівається до 1000 °С без впливу електромагнітопластичного ефекту.

Методика дозволяє проводити прискорені випробування на термоциклічну повзучість при високих швидкостях нагрівання та охолодження.

При дослідженні термоциклічної повзучості титанового сплаву ВТ20 з покриттями нагрівання та охолодження зразка здійснювалося з максимальною швидкістю до 100 град/с. Основними факторами, що пошкоджують, у прискорених термоциклічних випробуваннях є різкі тепломіни.

Час нагрівання термічного циклу (350↔640 °С) становить 15 с, час охолодження – 20 с.

У результаті проведених експериментальних досліджень титанових сплавів із вакуум-плазмовими покриттями отримані криві ізотермічної (рис. 1) і термоциклічної повзучості (рис. 2).

Дослідження повзучості титанового сплаву з вакуум-плазмовими покриттями, навіть в ізотермічних умовах, має ряд особливостей, при яких спостерігається як ефект зміцнення, так і незміцнення матеріалу основи. Різний склад і тип покриття підвищували опір повзучості основи або пластифікували її. Швидкість повзучості має ко-

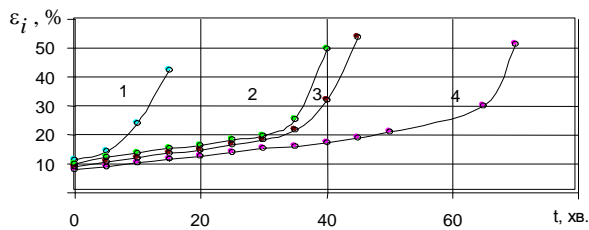
реляційний зв'язок із твердістю поверхневої зони і залежить від товщини покриття.

При температурах 400–650 °С швидкість повзучості зразків із покриттями TiN, (TiAl)N та (TiC)N менше ніж без покриття, оскільки рух дислокацій активізується переважно на поверхні матеріалу, тому спостерігається найбільш інтенсивна повзучість поверхневих шарів.

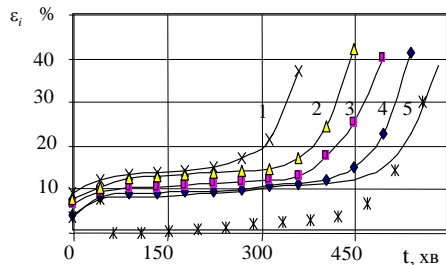
Без покриття стік дислокацій здійснюється на поверхні під дією напружень, що дорівнюють або більше ніж критичні для даних умов навантаження. Визначення періоду грат і фазового складу PVD-покриттів проводили на рентгенівському дифрактометрі “ДРОН” в фільтрованому мідному Cu-K $\alpha$  випромінюванні з наступним розрахунком і розшифровкою дифрактограми. Параметри кристалічних грат покриття відрізняються від параметрів титанових сплавів, що призводить до структурних змін, зменшенню параметрів грат в перехідній зоні, збільшенню критичних напружень.

Період кристалічних грат вакуум-плазмових покриттів TiN дорівнює 0,425 нм, (TiAl)N – 0,422 нм, (TiC)N – 0,432 нм.

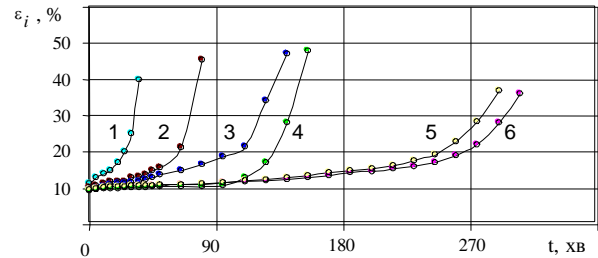
Установлено, що в покриттях існують зміцнювальні фази TiN, TiC та TiCN, тверді розчини Ti Al та тверді розчини впровадження N у Ti. Крім того, реалізується ефект Роско, який полягає в блокуванні покриттям виходу дислокацій на поверхню основного матеріалу, а також у блокуванні поверхневих джерел дислокацій



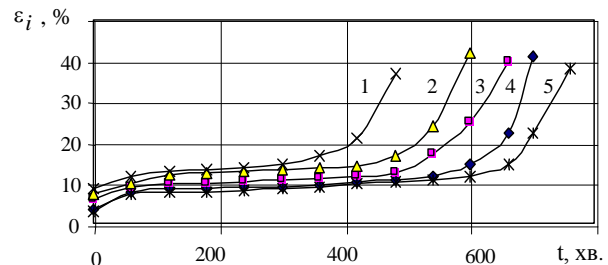
а



б



в



з

Рис. 1. Ізотермічна повзучість титанового сплаву ВТ20:

а: 1 – без покриття ( $T = 590$  °С); 2 – покриття (TiC)N ( $T = 640$  °С); 3 – покриття (TiAl)N ( $T = 623,4$  °С); 4 – покриття (TiAl)N ( $T = 606,7$  °С); б: 1 – без покриття ( $T = 560$  °С); 2 – покриття (TiC)N ( $T = 590$  °С); 3, 4 – покриття (TiAl)N ( $T = 573,4$  °С;  $T = 596,7$  °С); 5, 6 – покриття TiN ( $T = 566,7$  °С;  $T = 540$  °С); в: 1 – без покриття ( $T = 490$  °С); 2, 3 – покриття (TiC)N ( $T = 473,4$  °С;  $T = 456,7$  °С); 4, 5 – покриття TiN ( $T = 490$  °С;  $T = 498,3$  °С); з: 1 – без покриття ( $T = 430$  °С); 2 – покриття (TiAl)N ( $T = 406,7$  °С); 3, 4 – покриття TiN ( $T = 440$  °С;  $T = 423,4$  °С); 5 – покриття (TiC)N ( $T = 390$  °С)

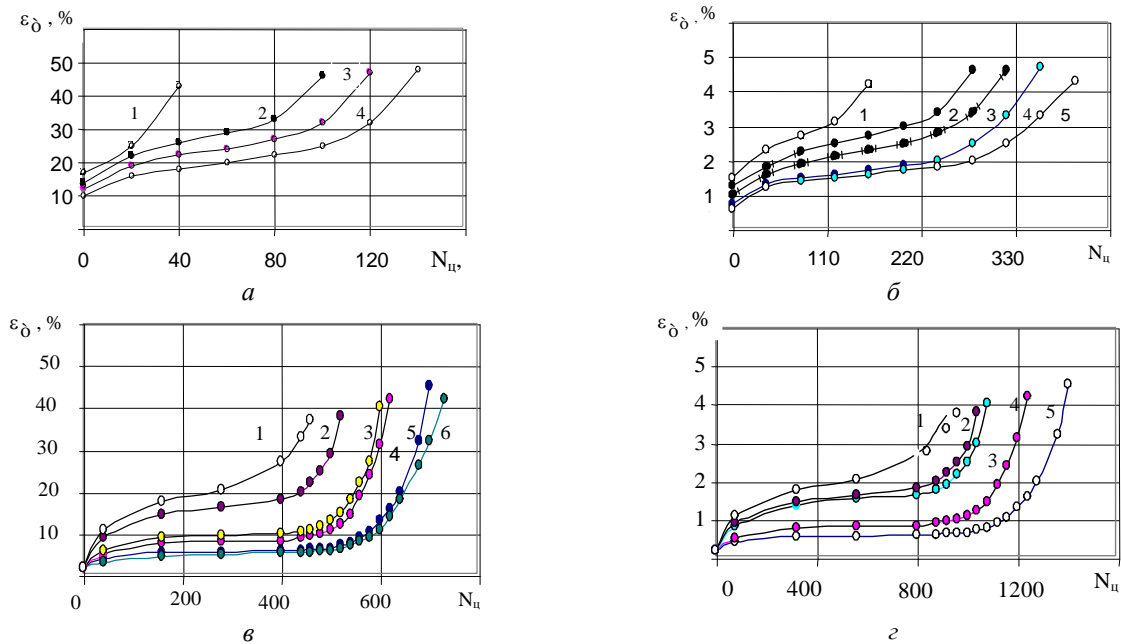


Рис. 2. Термоциклічна повзучість титанового сплаву ВТ20:

*a:* 1 – без покриття при  $T=610 \leftrightarrow 390$  °С; 2 – покриття (TiC)N при  $T=640 \leftrightarrow 420$  °С; 3 – покриття (TiAl)N при  $T=623 \leftrightarrow 400$  °С; 4 – покриття (TiAl)N при  $T=606 \leftrightarrow 389$  °С; *б:* 1 – без покриття при  $T=560 \leftrightarrow 340$  °С; 2 – покриття (TiC)N при  $T=590 \leftrightarrow 370$  °С; 3, 4 – покриття (TiAl)N при  $T=573,4 \leftrightarrow 350$  °С та при  $T=596,7 \leftrightarrow 376$  °С; 5 – покриття TiN при  $T=566,7 \leftrightarrow 345$  °С; *в:* 1 – без покриття при  $T=490 \leftrightarrow 270$  °С; 2 – покриття TiN при  $T=540 \leftrightarrow 310$  °С; 3, 4 – покриття (TiC)N при  $T=473,4 \leftrightarrow 252$  °С та при  $T=456,7 \leftrightarrow 230$  °С; 5, 6 – покриття TiN при  $T=498,3 \leftrightarrow 276,5$  °С та при  $T=490,3 \leftrightarrow 268,2$  °С; *г:* 1 – без покриття при  $T=430 \leftrightarrow 210$  °С; 2 – покриття (TiAl)N при  $T=406,7 \leftrightarrow 195,2$  °С; 3, 4 – покриття TiN при  $T=440 \leftrightarrow 221$  °С та при  $T=423,4 \leftrightarrow 200$  °С; 5 – покриття (TiC)N при  $T=390 \leftrightarrow 185$  °С

## Висновки

1. Підвищення механічних та фізико-механічних властивостей поверхневого шару з титанового сплаву ВТ20 шляхом нанесення багаточасткових вакуум-плазмових покриттів TiN, (TiAl)N та (TiC)N знижує ізотермічну та термоциклічну повзучість у два-чотири рази залежно від технологічних режимів їх нанесення. Найкращі характеристики мають титанові сплави з покриттям (TiAl)N.

2. Завдяки використанню вакуум-плазмового методу нанесення покриттів є можливість створювати багатофункціональні градієнтні покриття, які можуть істотно впливати на експлуатаційну надійність і довговічність конструкційних елементів авіаційної і космічної техніки, що виготовлені з титанових сплавів, а в перспективі бути основою для подальших досліджень нанесення захисних, зміцнювальних покриттів.

## Список літератури

1. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
2. Моисеев В.Н., Знаменская Е.В. Влияние нагрева в  $\alpha+\beta$  – и  $\beta$ -области на свойства и структуру сплавов титана с оловом и цирконием // Легирование и термическая обработка титановых сплавов. – М.: ВИАМ. – 1977. – С. 73–75.
3. Титановые сплавы в машиностроении / Б.Б. Чечулин, С.С. Ушаков, И.Н. Разуваева, В.Н. Гольдфайн / Под ред. Г.И. Капырина. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
4. Елисеєв Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении. – М.: Высш. шк., 1999. – 525 с.
5. Стяжкин В.А., Копылов А.А., Палеева С.Я. Вакуумно-плазменные покрытия системы Ti-N для компрессорных лопаток турбины // Защита металлов. – 2000. – №3. – С. 328–329.

Стаття надійшла до редакції 17.09.04.

Б.А. Ляшенко, В.В. Щепетов, В.И. Мирненко, А.В. Рутковский

Термомеханические свойства сплава ВТ20 с вакуум-плазменными покрытиями

Приведены результаты экспериментальных исследований на изотермическую и термоциклическую ползучесть титанового сплава ВТ20 с вакуум-плазменными покрытиями TiN, (TiAl)N и (TiC)N в интервале температур 350–640 °С при действии статической нагрузки  $0,8\sigma_B$ . Установлено понижение изотермической и термоциклической ползучести титанового сплава ВТ20 с вакуум-плазменными покрытиями.

В.А. Lyashenko, V.V. Shchepetov, V.I. Mirnenko, A.V. Rutkovskiy

Thermo mechanical characteristic of alloy VT 20 with vacuum-plasmatic covering

Results of the experimental studies are presented in article on and thermocycle creeping of titanium alloy ВТ20 from vacuum – plasmatic covering TiN, (TiAl)N and (TiC)N in interval of the temperature 350–640 °С at action of the steady-state load  $0,8\sigma_B$ . It is installed the isothermal and thermocycle creeping decreasing of titanium alloy ВТ20 from vacuum-plasmatic covering.