

УДК 67/68.05.004.15

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СКЛАДНОГО ТЕПЛООБМІНУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ  
ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT5-1  
З ЖАРОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ ПРИ ІЗОТЕРМІЧНОМУ  
ТА ТЕРМОЦИКЛІЧНОМУ РЕЖИМАХ**

В.М.ТОВТ, С.Ю. ЛПАТОВ

Київський національний університет технологій та дизайну

*У статті розглянуто результати дослідження процесів складного теплообміну та термомеханічних характеристик титанового сплаву VT5-1 з жаростійкими покриттями при ізотермічному режимі. В результаті проведених досліджень встановлено, що ізотермічний та термоциклічні процеси змінюють ступінь дифузійних процесів і збільшують твердість поверхневого шару титанового сплаву VT5-1*

**Об'єкти та методи дослідження**

Об'єктом дослідження став титановий сплав VT5-1 з покриттями жаростійкими емаллями. Дослідження проводились термомеханічними методами в ізотермічному та термоциклічному режимах при різних навантаженнях.

**Постановка завдання**

Мета роботи – дослідження процесів складного тепломасообміну та їх вплив на термомеханічні характеристики титанового сплаву VT5-1 з жаростійкими покриттями при ізотермічному та термоциклічному режимах.

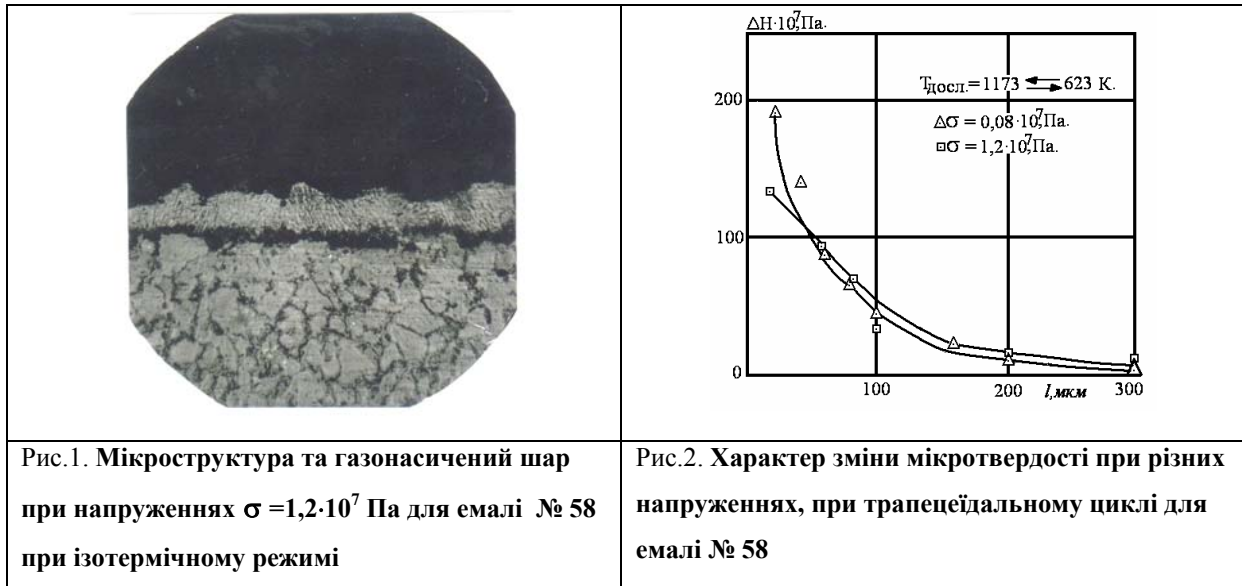
**Результати та їх обговорення**

В результаті проведених досліджень [1-4] було встановлено, що поведінка титанового сплаву VT5-1 з різними емалевими покриттями при ізотермічних умовах ( $T = 1173 \text{ K}$ ) і напруженнях  $\sigma = 1,0 \times 10^7 \text{ Па}$  неоднакова: для зразків з емаллями складу № 77 швидкість повзучості більша ніж у зразків з емаллями №№ 52 і 58, емаль № 58 справляє зміцнюючий вплив на титановий сплав, а емаль складу № 77 його пластифікує, збільшуючи швидкість повзучості порівняно з вихідними зразками в 2,9 раза. Можливо причинами такого поведіння є дифузійно-хімічні процеси, що відбуваються на межі контакту титанового сплаву VT5-1 з покриттям. З підвищенням температури досліджень різко зростає активність титанового сплаву VT5-1, і на його поверхні з'являються елементи, які не виявлені у вихідних зразках титану, але є в складі покриття. Одночасно в складі покриття виявлені елементи, що містяться в титановому сплаві VT5-1.

При ізотермічних дослідженнях відбувається взаємодифузія компонентів покриття і сплаву VT5-1, яка залежить від різної дифузійної рухливості елементів, що входять до складу титанового сплаву VT5-1 і покриття.

Аналіз мікроструктури показав, що при ізотермічних дослідженнях при  $T = 1173 \text{ K}$ , ступінь взаємодії титанового сплаву VT5-1 з керамічними покриттями зростає, що видно зі створення дифузійного шару, товщина якого залежить від часу досліджень і складу покриття і характеризується підвищеною мікротвердістю [5].

На рис.1 представлені мікроструктура і газонасичений шар зразків із титанового сплаву VT5-1 з покриттям емаллю №58 при температурі  $T = 1173\text{K}$  з глибиною газонасичення шару 150 мкм.



Відомо [5], що глибина газонасиченого шару і його мікротвердість – величини, за якими визначають інтенсивність взаємодії титану з жаростійкими емалевими покриттями. Тому взаємодія титанового сплаву VT5-1 з покриттям і ступінь його дифузійного насичення різними елементами оцінювалась не тільки за характером мікроструктури поверхневого шару сплаву, а й за зміною мікротвердості цих шарів [5].

Експериментальні криві зміни мікротвердості поверхневих шарів титанового сплаву VT5-1 після досліджень по трапецеїдальному циклу з різними напруженнями наведені на рис.2, 3. Заміри мікротвердості зроблені в двох взаємноперпендикулярних напрямках торцевих, розрізаних робочих частин дослідженого титанового сплаву.

Така методика дала можливість уникнути помилок у визначенні мікротвердості і достовірніше відобразити реальну картину розподілення мікротвердості. На рисунку по осі ординат відкладено середній приріст мікротвердості зовнішніх шарів титанового сплаву VT5-1 порівняно з серединою зразка, що виникла за рахунок взаємодії емалі з металом. Криві отримані після досліджень при напруженнях  $\sigma = 0,8 \cdot 10^7$  Па,  $\sigma = 1,2 \cdot 10^7$  Па. Зміна напруження на 30% не впливає на характер розподілення мікротвердості в шарах, достатньо віддалених від поверхні розділення титан-покриття, і глибину дифузійного шару. Проте помітна різниця спостерігається поблизу поверхневого шару глибиною майже 20 мкм. При цьому мікротвердість для зразків, досліджених при напруженнях  $\sigma = 0,8 \cdot 10^7$  Па, була на 25% вища, ніж у зразків, досліджених при напруженнях  $\sigma = 0,8 \cdot 10^7$  Па.

Вивчено вплив термоциклоування за різними тепловими програмами на ступінь взаємодії покриття з основою. Характер зміни мікротвердості при термоциклічних дослідженнях показано на рис. 2,3. При однакових напруженнях термоциклоування змінює характер кривих розподілення мікротвердості в дифузійній зоні. Вони розташовані більш круто в поверхневих шарах до 10 мкм, причому термоциклоування по трикутному циклу зменшує глибину дифузійної зони на 30% в порівнянні з ізотермічними дослідженнями і збільшує значення мікротвердості поверхневого шару до  $H = 225 \cdot 10^7$  Па.

<p><b>Рис.3. Характер зміни мікротвердості:</b>          • – при трикутному режимі; Δ – трапецеїдальному режимі; □ – ізотермічному режимі</p>	<p><b>Рис.4. Залежність швидкості повзучості ε від мікротвердості ΔH при різних напруженнях σ</b></p>
<p><b>Рис.5. Мікроструктура та газонасичений шар при термоциклічному режимі по трапецеїдальному циклу при напруженнях σ = 1,2 · 10<sup>7</sup> Па.</b></p>	<p><b>Рис.6. Мікроструктура та газонасичений шар при термоциклічному режимі по трапецеїдальному циклу при напруженні σ = 0,8 · 10<sup>7</sup> Па.</b></p>

Середнє значення величин мікротвердості поверхневих шарів глибиною приблизно 15 мкм становить: при ізотермічних дослідженнях –  $125 \cdot 10^7$  Па, при термоциклюванні по трапецеїдальному циклу –  $147 \cdot 10^7$  Па, при термоциклюванні по трикутному циклу –  $225 \cdot 10^7$  Па. При термоциклюванні сумарний час перебування зразка при максимальній температурі суттєво менший, ніж при випробуваннях в ізотермічному режимі при тій же температурі. Проте прирощування мікротвердості, викликане дифузійним насиченням, вище для термоциклічного режиму. Отже, основний внесок в дифузійну рухливість роблять не термодифузійні процеси, а дія термічних напружень, викликаних різкими циклічними теплозмінами. Із цього виходить, що при випробуваннях в термоциклічних режимах мають місце два фактори:

1. Збільшення мікротвердості поверхневого шару при зміні форм циклу, що свідчить про збільшення хіміко-дифузної взаємодії сплаву ВТ5–1 з силікатним покриттям.
2. Збільшення мікротвердості поверхневого шару призводить до зменшення швидкості повзучості, тобто існує кореляційна залежність між швидкістю повзучості сплаву з емалевим покриттям і величиною мікротвердості поверхневого шару сплаву ВТ5–1.

На рис.4 показана залежність швидкості повзучості, яка встановилася на ділянці від мікротвердості поверхневого шару глибиною 20 мкм, для напружень  $\sigma = 0,8 \cdot 10^7$  Па та  $\sigma = 1,2 \cdot 10^7$  Па.

На рис. 5, 6 представлені мікроструктура і газонасичений шар зразків 1, 2 із титанового сплаву VT5-1 з покриттям емаллю № 58 при напруженні  $\sigma = 0,8 \cdot 10^7$  Па – (рис. 6) та при напруженні  $\sigma = 1,2 \cdot 10^7$  Па – (рис. 5):

Рис. 5 – у термоциклічному режимі по трапецеїдальному циклу  $T = 1173 \text{ K} \div 623 \text{ K}$  з глибиною газонасиченого шару 300 мкм, альфірованого шару – 74 мкм,  $H = 147 \cdot 10^7$  Па;

Рис. 6 – у термоциклічному режимі по трапецеїдальному циклу  $T = 1173 \text{ K} \div 623 \text{ K}$  з глибиною газонасиченого шару 300 мкм, альфірованого шару – 58 мкм,  $H = 190 \cdot 10^7$  Па.

### **Висновки**

В результаті проведених досліджень встановлено, що ізотермічний і термоциклічні процеси змінюють ступінь дифузійних процесів і збільшують твердість поверхневого шару титанового сплаву VT5-1.

1. Зміна статичного напруження на 30% не впливає на характер розподілення мікротвердості в шарах, достатньо віддалених від поверхні розділу титан-покриття і глибину дифузійної зони при термоциклічних дослідженнях.

2. Термоциклювання змінює ступінь дифузійно-хімічних процесів, що відбуваються на межі контакту металу з покриттям, і збільшує твердість поверхневого шару сплаву VT5-1.

3. Швидкість повзучості титанового сплаву VT5-1 має кореляційну залежність від величини мікротвердості поверхневого шару.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Уманський Є.С., Товт В.М., Ляшенко Б.А. Повзучість сплаву VT5-1 із захисними емалевими покриттями на повітрі.- //Проблеми міцності, – 1977, –3 9. – с.46-48.
2. Резнік С.В., Товт В.М., Луцик Р.В. та інш. Дослідження термомеханічних властивостей титанового сплаву VT5-1 з жаростійкими покриттями. Повідомлення 1. Дослідження ізотермічної і термоциклічної повзучості титанового сплаву VT5-1 з жаростійкими покриттями // Вісник КНУТД, – 2006– № 2. – с.113–121.
3. ДСТУ 2637-94. Методи прискорення випробувань України № 163 від 29 червня 1994.- с.13.
4. Резнік С.В., Зенкін Н.А., Товт М.В., Луцик Р.В., Товт В.М. Дослідження термомеханічної властивості титанового сплаву VT5-1 з жаростійкими покриттями. Повідомлення 2. Вплив високотемпературної повзучості титанового сплаву VT5-1 на критерії зміни пружних і міцнісних властивостей жаростійких емалевих покриттів // Вісник КНУТД, – 2006, –№ 3. – с.85-89
5. Ситникова, Аппен А.А., Федоров В.Н. Дифузійно-хімічні процеси на межі титану із силікатним покриттям і розтопленнями. – В кн.: Захисні покриття на металах. – К.: Наукова думка, – 1974, вип.8, – с.27–34.
6. Цигульов О.В., Ляшенко Б.А., Ситникова А.А., Товт В.М. Вплив термоциклювання на повзучість титанового сплаву із склокерамічними покриттями. У зб.: VIII Всесоюзное совещание по жаростойким покрытиям. – Л.: Наука, – 1977. – с.203–212.

Надійшла 27.05.2009