

669.295  
X 46



В.М. Федірко, І.М. Погрелюк,  
О.Г. Лук'яненко, В.С. Труш

**ХІМІКО-ТЕРМІЧНА  
ОБРОБКА  
ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ  
ПОВЕРХНЕВЕ  
ТВЕРДОРОЗЧИННЕ  
МОДИФІКУВАННЯ**

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. Г. В. КАРПЕНКА

В. М. ФЕДІРКО, І. М. ПОГРЕЛЮК,  
О. Г. ЛУК'ЯНЕНКО, В. С. ТРУШ

**ХІМІКО-ТЕРМІЧНА  
ОБРОБКА ТИТАНОВИХ  
СПЛАВІВ. ПОВЕРХНЕВЕ  
ТВЕРДОРОЗЧИННЕ  
МОДИФІКУВАННЯ**

---

*ПРОЄКТ  
«НАУКОВА КНИГА»*

---

КИЇВ • НАУКОВА ДУМКА • 2020

УДК 669.295:621.785

У монографії систематизовано доробок авторів у галузі модифікування поверхневих шарів титанових сплавів формуванням регламентованих градієнтних дифузійних шарів елементів втілення (кисень, азот, вуглець). З огляду на кінетичні закономірності високотемпературної взаємодії титанових сплавів з елементами втілення викладено концепцію інженерії поверхні титанових сплавів термодифузійним насиченням із контрольованих газових середовищ. Запропоновано алгоритм впливу на параметри оброблення для формування поверхневих твердорозчинних шарів регламентованих параметрів. Оцінено міцнісні та втомні характеристики титанових сплавів та їх зварних з'єднань за різних умов навантаження залежно від рівня регламентованого твердорозчинного зміцнення. Проілюстровано еволюцію фазово-структурного та напруженого станів, субзеренної та тонкої структур, особливості руйнування модифікованого шару титану в цих умовах. Подано феноменологічну модель процесу дифузійного насичення титану елементами втілення за нестационарних умов масообміну на межі середовище—метал, яка враховує дифузійний підвід до поверхні, поверхневі процеси (хемосорбція та хімічна взаємодія) та дифузію елементів у об'єм металу. Модель дає змогу прогнозувати параметри хіміко-термічної обробки для отримання регламентованого поверхневого твердорозчинного зміцнення титанових сплавів.

Для фахівців, які працюють у галузі матеріалознавства та поверхневої обробки металів, а також студентів та аспірантів відповідних спеціальностей.

**Р е ц е н з е н т и :**

доктор технічних наук, професор О. П. ОСТАШ,  
доктор технічних наук, старший науковий співробітник П. С. МАРКОВСЬКИЙ

*Затверджено до друку вченою радою  
Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України  
(протокол № 7 від 05.09.2018 р.)*

***Видання здійснено за кошти Цільової комплексної програми  
«Створення та розвиток науково-видавничого комплексу  
НАН України»***

Науково-видавничий відділ фізико-математичної  
та технічної літератури

Редактор *О. А. Микитенко*

© В. М. Федірко, І. М. Погрелюк, О. Г. Лук'яненко, В. С. Труш, 2020

© НВП «Видавництво “Наукова думка”  
НАН України», дизайн, 2020

ISBN 978-966-00-1724-5

## ЗМІСТ

Передмова .....	3
<b>Р О З Д І Л 1 Поверхнєве зміцнення титанових сплавів у кисне-, азото- і вуглецевмісних середовищах як спосіб впливу на фізико-механічні властивості титанових сплавів.....</b>	<b>5</b>
1.1. Фізико-хімічні засади взаємодії титану з елементами втілення .....	6
1.1.1. Взаємодія титану з киснем.....	6
1.1.2. Взаємодія титану з азотом.....	11
1.1.3. Взаємодія титану з вуглецем .....	17
1.2. Вплив поверхневого зміцнення елементами втілення на механічні властивості титану та його сплавів.....	20
1.2.1. Поверхнєве зміцнення титанових сплавів у кисневмісному газовому середовищі.....	21
1.2.2. Регламентоване твердорозчинне зміцнення поверхневого шару киснем як спосіб підвищення експлуатаційних властивостей титану .....	27
1.2.3. Критерії експлуатаційної придатності виробів із титанових сплавів із газонасиченими шарами .....	30
1.2.4. Вплив азотування на втомну міцність і втомну довговічність титанових сплавів .....	32
1.2.5. Вплив вуглецю на механічні властивості титанових сплавів .....	36
<b>Р О З Д І Л 2. Кінетичні закономірності високотемпературної взаємодії титанових сплавів із елементами втілення .....</b>	<b>41</b>
2.1. Кінетика взаємодії титанових сплавів ( $\alpha$ , псевдо- $\alpha$ , $\alpha + \beta$ ) з кисневмісним газовим середовищем .....	41
2.1.1. Кінетика зміни маси титанових сплавів VT1-0, VT5, OT4-1 і VT16 за взаємодії з розрідженим кисневмісним газовим середовищем .....	42
2.1.2. Вплив температури та тривалості насичення на твердість поверхні металу та глибину зміцненої зони .....	46
2.1.3. Вплив парціального тиску кисню на твердість поверхні металу та глибину зміцненої зони .....	56
2.2. Кінетика взаємодії титанових сплавів ( $\alpha$ , псевдо- $\alpha$ , $\alpha + \beta$ ) з азотовмісним газовим середовищем .....	58
2.2.1. Кінетика азотування в розрідженому динамічному потоці азоту .....	60
2.2.2. Формування зміцнених азотованих шарів .....	69

## Зміст

2.3. Кінетика взаємодії титанових сплавів ( $\alpha$ , псевдо- $\alpha$ , $\alpha + \beta$ ) із вуглецевмісним газовим середовищем .....	74
2.3.1. Кінетика зміни маси $\alpha$ -титанових сплавів VT1-0, VT5-1, ПТ-7М .....	75
2.3.2. Кінетика зміни маси псевдо- $\alpha$ -титанового сплаву OT4-1 .....	79
2.3.3. Кінетика зміни маси $\alpha + \beta$ -титанових сплавів VT14 і VT19 .....	81
2.4. Концепція інженерії поверхні титанових сплавів у контрольованих газових середовищах .....	83
<b>Р О З Д І Л 3. Вплив рівня регламентованого градієнтного твердорозчинного приповерхневого зміцнення на механічні характеристики титанових сплавів .....</b>	<b>89</b>
3.1. Міцнісні та втомні характеристики титанових сплавів за різних умов навантаження.....	89
3.1.1. Утомна довговічність за умов чистого згину .....	90
3.1.2. Утомна довговічність за умов багатопиклового обертового згину .....	93
3.1.3. Утомна довговічність за умов циклічного розтягу.....	97
3.1.4. Опірність сповільненому руйнуванню під тривалим статичним навантаженням .....	98
3.2. Підвищення втомної міцності та довговічності виробів з $\alpha$ - та псевдо- $\alpha$ -сплавів титану.....	100
<b>Р О З Д І Л 4. Природа підвищення довговічності титанових сплавів із регламентованим градієнтним твердорозчинним зміцненим поверхневим шаром .....</b>	<b>108</b>
4.1. Вплив регламентованого градієнтного твердорозчинного зміцнення на субзернову структуру та напружений стан поверхневих шарів титану .....	108
4.2. Вплив регламентованого градієнтного твердорозчинного зміцнення на фазово-структурний стан поверхневого шару титанових сплавів .....	110
4.3. Еволюція тонкої структури регламентованого градієнтного твердорозчинного зміцненого шару металу .....	112
4.4. Особливості руйнування титанових сплавів після регламентованого градієнтного твердорозчинного зміцнення .....	118
4.4.1. Випробування сплаву VT1-0 на циклічний розтяг.....	118
4.4.2. Випробування сплаву VT1-0 на обертовий згин .....	119
4.4.3. Випробування сплавів VT1-0, ПТ-7М і OT4-1 на сповільнене руйнування .....	120
4.4.4. Випробування сплаву VT1-0 на чистий згин .....	122
<b>Р О З Д І Л 5. Підвищення ресурсу зварних з'єднань однофазних титанових сплавів за відпалу в контрольованому кисневмісному середовищі .....</b>	<b>124</b>
5.1. Вплив параметрів технологічного середовища відпалу на втомну довговічність та опірність сповільненому руйнуванню зварних з'єднань однофазних титанових сплавів VT1-0 і ПТ-7М.....	125

## З м і с т

---

5.2. Вплив параметрів технологічного середовища відпалу на шорсткість поверхні зварних з'єднань однофазних титанових сплавів ВТ1-0 і ПТ-7М.....	136
5.3. Вплив технологічного середовища на розподіл твердості та статистичної зони руйнування зонами зварного з'єднання титану ВТ1-0.....	143
<b>Р О З Д І Л 6. Моделювання процесів дифузійного насичення титану елементами втілення</b> .....	<b>145</b>
6.1. Термодинамічний та кінетичний аспекти високотемпературної взаємодії титану з елементами втілення .....	145
6.2. Однокомпонентне дифузійне насичення титану елементом втілення.....	147
6.3. Одночасне дифузійне насичення титану азотом і киснем .....	151
6.4. Термодифузійне насичення $\alpha$ -титану елементами втілення за нестационарних умов масообміну.....	155
6.5. Прогнозування температурно-часових параметрів обробки.....	162
Список літератури .....	167