

УДК 539.3620.194:621.795

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.240418.57.268

## КІНЕТИКА НАВУГЛЕЦЮВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ЗА ТЕРМОДИФУЗІЙНОГО НАСИЧЕННЯ З ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА

ЛУК'ЯНЕНКО О. Г.<sup>1</sup>, к. т. н., с. н. с.,ТРУШ В. С.<sup>2\*</sup>, к. т. н., с. н. с.,ФЕДІРКО В. М.<sup>3</sup>, д. т. н., проф., гол. н. с.

<sup>1</sup> Відділ високотемпературної міцності конструкційних матеріалів у газових та рідкометалевих середовищах, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79060, e-mail: [AGNSLUkyanenko@i.ua](mailto:AGNSLUkyanenko@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-6642-2300

<sup>2\*</sup> Відділ високотемпературної міцності конструкційних матеріалів у газових та рідкометалевих середовищах, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79060, e-mail: [trushvasyl@gmail.com](mailto:trushvasyl@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-2264-3918

<sup>3</sup> Відділ високотемпературної міцності конструкційних матеріалів у газових та рідкометалевих середовищах, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, Львів, Україна, 79060, e-mail: [fedirko@ipm.lviv.ua](mailto:fedirko@ipm.lviv.ua), ORCID ID: 0000-0002-4337-1691

**Анотація.** Мета дослідження – встановити закономірності високотемпературної взаємодії титанових сплавів з вуглецевмісним газовим середовищем. **Методика.** Досліджували зразки промислових титанових сплавів  $\alpha$ - (BT5-1 і ПТ-7М), псевдо- $\alpha$ - (OT4-1), ( $\alpha+\beta$ ) – (BT14 і BT19) класів. Після виготовлення зразки відпалювали у вакуумі за режимом:  $T = 800$  °C,  $\tau = 5$  год,  $P = 0,05$  мПа,  $I_{\min} = 0,1$  мПа  $\times$  дм<sup>3</sup>  $\times$  с<sup>-1</sup>. Насичувальним середовищем слугувала газова суміш аргону з пропаном. Об'ємний вміст пропану складав 16,7 %. Титанові сплави насичували за температур  $T = 750$  °C, 800 °C та 850 °C протягом 1, 3 і 5 год. **Результати.** Згідно з аналізом гравіметричних даних, показано, що в аргоно-пропановій суміші з тиском  $P = 0,106$  Па за різних температур ( $T = 750, 800$  та 850 °C, протягом 1, 3 та 5 год.) маса зразків сплаву BT1-0 збільшується за лінійним законом. Кінетика насичення вуглецем сплаву BT5-1 має значні відхилення від лінійності й самі значення приросту маси після 5 год витримки майже удвічі менші, ніж для сплаву BT1-0. Взаємодія псевдо- $\alpha$ -титанового сплаву OT4-1 із розрідженим вуглецевмісним газовим середовищем за високих температур ( $T = 750, 800$  та 850 °C) супроводжується втратою маси зразками. Взаємодія титанових сплавів BT14 та BT19 з вуглецевмісним газовим середовищем за залишкового тиску  $P = 0,106$  Па характеризується монотонним збільшенням маси зразків за досліджуваних температур та тривалості. **Наукова новизна.** Встановлено, що взаємодія за високих температур ( $T = 750..850$  °C) титанових сплавів із розрідженим вуглецевмісним газовим середовищем ( $Ar + 16,7$  %  $C_3H_8$ ) за тиску  $P = 0,106$  Па зумовлює збільшення маси зразків за законом, що наближається до лінійного, що свідчить про контролювальну стадію взаємодії – реакції на межі газ – метал. **Практична значимість.** Високотемпературна взаємодія титанових сплавів із вуглецевмісним газовим середовищем супроводжується спотворенням кристалічної ґратки поверхневого шару металу, що повинно відповідним чином вплинути на фізико-механічні властивості приповерхневого шару металу.

*Ключові слова:* титановий сплав; газове середовище; вуглець; кінетика; структурний клас

## КИНЕТИКА НАУГЛЕРОЖИВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ПРИ ТЕРМОДИФУЗИОННОМУ НАСЫЩЕНИИ ИЗ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

ЛУК'ЯНЕНКО А. Г.<sup>1</sup>, к. т. н., с. н. с.,ТРУШ В. С.<sup>2\*</sup>, к. т. н., с. н. с.,ФЕДІРКО В. М.<sup>3</sup>, д. т. н., проф., гол. н. с.

<sup>1</sup> Отдел високотемпературной прочности конструкционных материалов в газовых и редкометаллических средах, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Наукова, 5, Львов, Украина, 79060, e-mail: [agnslukyanenko@i.ua](mailto:agnslukyanenko@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-6642-2300

<sup>2\*</sup> Отдел високотемпературной прочности конструкционных материалов в газовых и редкометаллических средах, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Наукова, 5, Львов, Украина, 79060, e-mail: [trushvasyl@gmail.com](mailto:trushvasyl@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-2264-3918

<sup>3</sup> Отдел високотемпературной прочности конструкционных материалов в газовых и редкометаллических средах, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Наукова, 5, Львов, Украина, 79060, e-mail: [fedirko@ipm.lviv.ua](mailto:fedirko@ipm.lviv.ua), ORCID ID: 0000-0002-4337-1691

**Аннотация.** Цель исследования – установить закономерности высокотемпературного взаимодействия титановых сплавов с углеродсодержащей газовой средой. **Методика.** Исследовали образцы промышленных титановых сплавов  $\alpha$ - (BT5-1 и ПТ-7М), псевдо- $\alpha$ - (OT4-1), ( $\alpha + \beta$ ) – (BT14 и BT19) классов. После изготовления образцы отжигали в вакууме

по режиму:  $T = 800$  °C,  $\tau = 5$  ч,  $P = 0,05$  МПа,  $I_{\min} = 0,1$  мПа  $\times$  дм<sup>3</sup>  $\times$  с<sup>-1</sup>. Насыщающей средой служила газовая смесь аргона с пропаном. Объемное содержание пропана составляло 16,7 %. Титановые сплавы насыщали при температурах  $T = 750$  °C, 800 °C и 850 °C в течение 1, 3 и 5 ч. **Результаты.** Согласно анализу гравиметрических данных показано, что в аргонно-пропановой смеси с давлением  $P = 0,106$  Па при различных температурах ( $T = 750, 800$  и 850 °C в течение 1, 3 и 5 ч.) масса образцов сплава VT1-0 увеличивается по линейному закону. Кинетика насыщения углеродом сплава VT5-1 имеет значительные отклонения от линейности и сами значения прироста массы после 5 часов выдержки почти в 2 раза меньше, чем для сплава VT1-0. Взаимодействие титановых сплавов VT14 и VT19 с углеродсодержащей газовой средой при остаточном давлении  $P = 0,106$  Па характеризуются монотонным увеличением массы образцов при исследуемых температурах и продолжительности. **Научная новизна.** Установлено, что взаимодействие при высоких температурах ( $T = 750 \dots 850$  °C) титановых сплавов с разреженной углеродсодержащей газовой средой (Ar + 16,7 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) при давлении  $P = 0,106$  Па приводит к увеличению массы образцов по закону, приближающемуся к линейному, что свидетельствует о контролирующей стадии взаимодействия реакций на границе газ – металл. **Практическая значимость.** Высокотемпературное взаимодействие титановых сплавов с углеродсодержащей газовой средой сопровождается искажением кристаллической решетки поверхностного слоя металла, что должно соответствующим образом повлиять на физико-механические свойства приповерхностного слоя металла.

*Ключевые слова:* титановый сплав; газовая среда; углерод; кинетика; структурный класс

## KINETICS CARBURIZATION OF TITANIUM ALLOYS DURING THERMAL DIFFUSION SATURATION FROM GASEOUS MEDIUM

LUKYANENKO A.G.<sup>2</sup>, *Ph. D., Senior Researcher,*  
TRUSH V.S.<sup>1\*</sup>, *Ph. D., Senior Researcher,*  
Fedirko V.N.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof., Chief researcher*

<sup>1</sup> Department of high temperature strength of structural materials in gas and liquid metal media, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, st. Naukova, 5, Lviv, Ukraine, 79060, e-mail: [AGNSLukyanyenko@i.ua](mailto:AGNSLukyanyenko@i.ua), ORCID ID: 0000-0001-6642-2300

<sup>2\*</sup> Department of high temperature strength of structural materials in gas and liquid metal media, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, st. Naukova, 5, Lviv, Ukraine, 79060, e-mail: [trushvasyl@gmail.com](mailto:trushvasyl@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-2264-3918

<sup>3</sup> Department of high temperature strength of structural materials in gas and liquid metal media, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, st. Naukova, 5, Lviv, Ukraine, 79060, e-mail: [fedirko@ipm.lviv.ua](mailto:fedirko@ipm.lviv.ua), ORCID ID: 0000-0002-4337-1691

**Abstract.** *The purpose of the study* is to establish the patterns of high-temperature interaction of titanium alloys with carbon-containing gaseous media. **Methodology.** Investigated samples of industrial titanium alloys  $\alpha$ - (VT5-1 and PT-7M), pseudo-(OT4-1), ( $\alpha + \beta$ ) – (VT14 and VT19) classes. After fabrication, the samples were annealed in vacuum according to the mode:  $T = 800$  °C,  $\tau = 5$  h,  $P = 0.05$  MPa,  $I_{\min} = 0,1$  mPa  $\times$  дм<sup>3</sup>  $\times$  с<sup>-1</sup>. The saturating medium was a gas mixture of argon and propane. The volume content of propane was 16.7%. Titanium alloys were saturated at temperatures  $T = 750$ °C, 800°C and 850°C for 1 hour, 3 hours and 5 hours. **Results.** Bottom analysis of gravimetric data obtained by discrete gravimetry showed that in the argon-propane mixture with pressure  $P = 0.106$  Pa at various temperatures ( $T = 750, 800$  and 850 °C for 1, 3 and 5 hours). The mass of samples of the VT1-0 alloy increases linearly. The carbon saturation kinetics of the VT5-1 alloy has significant deviations from linearity and the actual weight gain after 5 hours of exposure is almost 2 times less than for the VT1-0 alloy. The interaction of titanium alloys VT14 and VT19 with a carbon-containing gaseous medium at a residual pressure of  $P = 0.106$  Pa is characterized by a monotonic increase in the mass of the samples beyond the temperatures and duration under study. **Originality.** It has been established that the interaction at high temperatures ( $T = 750 \dots 850$  °C) of titanium alloys with a rarefied carbon-containing gas medium (Ar + 16.7 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) at a pressure of  $P = 0.106$  Pa leads to an increase in the mass of the samples, approaching linear, indicating a controlling stage of interaction – reactions at the gas – metal interface. **Practical value.** High temperature interaction of titanium alloys with a carbon-containing gaseous medium is accompanied by deviation of parameters of the crystal lattice of the hardened layers. Carburization seems to influence physical-chemical properties of the near-surface layer of metal.

*Keywords:* titanium alloy; gaseous medium; carbon; kinetics; structural class

### Вступ

Титанові сплави завдяки притаманному їм високому комплексу фізичних, хімічних та механічних властивостей – це унікальні матеріали для багатьох галузей промисловості [1–3]. Особливість титану полягає у його високій реакційній здатності

щодо елементів проникнення (кисню, азоту й вуглецю) [4; 5]. Поглинання титановими сплавами елементів проникнення зумовлює зміну фізико-механічних властивостей сплавів та виробів із них [6–8]. Тому у виборі режимів термообробки (температур, тривалості обробки та газодинамічних параметрів середовища) необхідно враховувати взаємодію титанових сплавів з елементами

проникнення та прогнозувати наслідки їх впливу на експлуатаційні властивості виробів. Якщо закономірності взаємодії титанових сплавів із кисневмісним та азотовмісним газовим середовищем висвітлено досить широко, то взаємодія титану з вуглецевмісним газовим середовищем вивчена незначно. Однак слід враховувати, що під час хіміко-термічної обробки виробів із титанових сплавів взаємодія титанових сплавів відбувається не лише з киснем та азотом, але й з вуглецем [2; 9].

Слід зазначити також, що титанові сплави класифікують, зокрема, за структурним складом. Дослідження титанових сплавів різних структурних складів дасть можливість урахувати їх структурні особливості на кінетику взаємодії з елементами проникнення.

### Мета дослідження

Установити основні закономірності високотемпературної взаємодії титанових сплавів різних структурних складів ( $\alpha$  та  $(\alpha+\beta)$ ) з вуглецевмісним газовим середовищем.

### Матеріали та методика досліджень

Для оцінювання впливу структури сплаву на характер його взаємодії з вуглецевмісним середовищем досліджували зразки промислових титанових сплавів  $\alpha$ - (BT1-0, BT5-1, ПТ-7М),  $(\alpha+\beta)$  – (BT14, BT19) класів [2].

Після виготовлення зразки для формування вихідного фазово-структурного стану (зняття залишкових напружень, видалення водню, гомогенізації й стабілізації структури) відпалювали у вакуумі за режимом:  $T = 800$  °С,  $\tau = 5$  год,  $P = 0,05$  МПа,  $I_{\min} = 0,1$  МПа  $\times$  дм<sup>3</sup>  $\times$  с<sup>-1</sup>. У вихідному стані міцність і пластичність досліджуваних сплавів становили: BT1-0 –  $\sigma_b = 450$  МПа,  $\delta = 27$  %; ПТ-7М –  $\sigma_b = 550$  МПа,  $\delta = 24$  %; OT4-1 –  $\sigma_b = 655$  МПа,  $\delta = 21,5$  %.

Для науглецювання титанових сплавів використовували установку для відпалу у вакуумі та контрольованих газових середовищах, що розроблена у ФМІ НАН України. Насичувальним середовищем слугувала газова суміш аргону з пропаном. Об'ємний вміст пропану складав 16,7 %.

Зразки титанових сплавів до температури насичення нагрівали у вакуумі  $P = 26,6$  МПа, після досягнення температури насичення ( $T = 750, 800, 850$  °С) у реакційну камеру напускали газову суміш ( $Ar + 16,7\% C_3H_8$ ), тиск якої за рахунок постійного її напуску (натікання) підтримували на рівні  $P(Ar+C_3H_8) = 0,106$  Па, парціальний тиск пропану складав  $p_{C_3H_8} = 18$  МПа. Постійна концентрація насичувальної складової ( $C_3H_8$ ) забезпечувалася неперервним напусканням вуглецевмісної газової суміші. Після закінчення насичувальної витримки тривалістю  $\tau = 1 \dots 5$  год камеру вакуумували і зразки охолоджували разом із піччю. Після охолодження

реакційну камеру розгерметизували та виймали зразки для подальших досліджень.

### Результати та їх обговорення

Під час високотемпературної взаємодії титанових сплавів із технологічними середовищами, які можуть містити кисень, азот і вуглець, над взаємодією з вуглецем та утворенням карбіду титану, згідно з термодинамічними розрахунками, переважатимуть процеси окиснення та азотування титану, навіть за пониження тиску газових компонент середовища переважатимуть окиснення та азотування [9]. Тому для взаємодії титанових сплавів переважно з вуглецем було обрано газове середовище, яке складалося з очищеного (від кисню й азоту) аргону та пропану ( $C_3H_8$ ). Оскільки енергія утворення твердих розчинів втілення дещо переважає енергію утворення відповідних сполук, для уповільнення кінетичного фактора і переважного утворення дифузійного шару (твердого розчину) вуглецю в титані, титанові сплави насичували у розрідженому потоці газової суміші ( $Ar + 16,7\% C_3H_8$ ) з тиском  $P = 0,106$  Па за температур  $T = 750, 800$  та  $850$  °С протягом 1, 3 і 5 год.

Аналіз результатів обрахунку зміни ізобарно-ізотермічного потенціалу утворення пропану з вуглецю й водню свідчить, що нагрівання пропану за нормального тиску (1 атм) спричинить його дисоціацію за температур вищих  $T \geq 800$  °С (рис. 1, крива 1), а зниження його парціального тиску до умов експерименту  $p_{C_3H_8} = 0,018$  Па спричинить дисоціацію пропану вже за температур, вищих за  $T \geq 320$  °С (рис. 1, крива 2).

Зі збільшенням парціального тиску пропану за зазначених температур на поверхні титанових сплавів спостерігалася утворення фазової плівки карбіду титану (TiC).

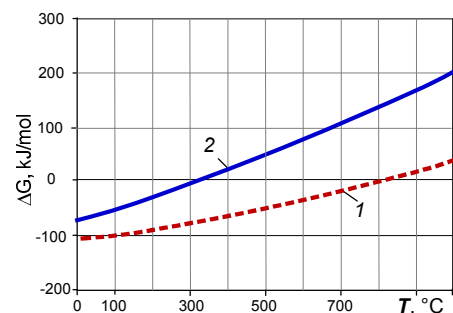


Рис. 1. Зміна ізобарно-ізотермічного потенціалу утворення пропану залежно від температури за різного тиску пропану: 1 – 10 100 Па; 2 – 0,018 Па / Fig. 1. Dependence of isobaric-isothermal potential of propane formation on temperatures at different pressures of propane: 1 – 10 100 Pa; 2 – 0.018 Pa

Кінетика зміни маси  $\alpha$ -титанових сплавів BT1-0, BT5-1, ПТ-7М. У результаті взаємодії  $\alpha$ -титанових сплавів із розрідженим вуглецевмісним газовим середовищем за високих температур ( $T = 750, 800$  та

850°C) протягом 1, 3 та 5 год. маса зразків збільшується (табл. 1, рис. 2).

Таблиця 1

**Питомий приріст маси зразків  $\alpha$ -титанових сплавів у результаті взаємодії з вуглецевмісним газовим середовищем із залишковим тиском  $P = 0,106$  Па залежно від температури та тривалості взаємодії / Specific increase in the mass of samples of  $\alpha$ -titanium alloys as a result of interaction with a carbon-containing gas medium with residual pressure  $P = 0.106$  Pa depending on the temperature and duration of the interaction**

Сплав	$T, ^\circ\text{C}$	$\Delta M/S$ (мг/см <sup>2</sup> )		
		1 год	3 год	5 год
BT1-0	750	0,0118	0,0246	0,0507
	800	0,0285	0,0526	0,0833
	850	0,0375	0,1301	0,2030
BT5-1	750	0,0146	0,0591	0,0295
	800	0,0147	0,0743	0,0591
	850	0,0147	0,0151	0,0903
ПТ-7М	750	0,1180	0,1166	0,0883
	800	0,1037	0,0875	0,1179
	850	0,0319	0,1322	0,1455

Аналіз даних, отриманих дискретною гравіметриєю, показав, що в аргано-пропановій суміші з тиском  $P = 0,106$  Па за різних температур маса зразків сплаву BT1-0 збільшується за лінійним законом (рис. 2). Цей закон справедливий, коли швидкість поглинання газу контролюється реакціями на межі фаз, що можливо, якщо швидкість проникнення газу через поверхню металу достатньо висока, приміром, за відсутності або за поруватості поверхневої фазової плівки.

Кінетика насичення вуглецем сплаву BT5-1 має значні відхилення від лінійності й самі значення приросту маси після 5 год. витримки майже удвічі менші, ніж для сплаву BT1-0 (табл. 1, рис. 2).

Розчинення вуглецю в приповерхневому шарі  $\alpha$ -титанових сплавів супроводжується змінами в кристалічній ґратці, які фіксуються рентгеноструктурним аналізом (табл. 2).

Як свідчать результати, спотворення параметрів  $a$  та  $c$  ГЦУ ґратки  $\alpha$ -титану відбувається по-різному, але осьове співвідношення  $c/a$  збільшується, що опосередковано свідчить про збільшення кількості розчиненого в титані вуглецю [8].

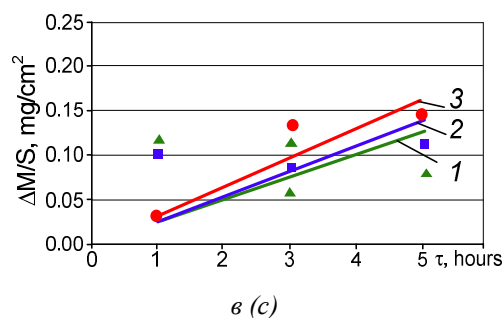
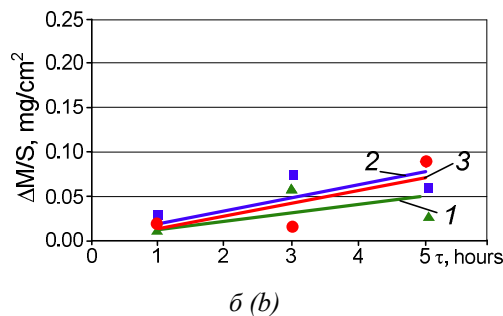
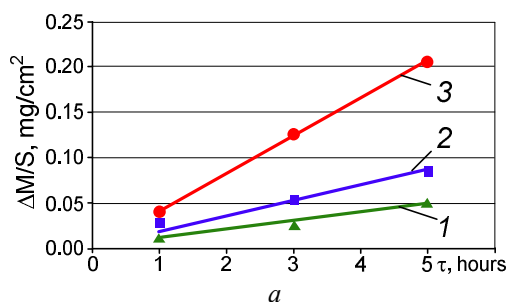


Рис. 2. Кінетика зміни маси зразків сплаву BT1-0 (а) BT5 (б) і ПТ-7М (в) в аргано-пропановій суміші  $P = 0,106$  Па за різних температур: 1 – 850 °C, 2 – 800 °C, 3 – 750 °C /

Fig. 2. Kinetics of change in mass (after treatment) of the  $\alpha$ -titanium alloys BT1-0 (a), BT5 (b), and ПТ-7М (c) in carbon-containing gaseous medium at different temperatures: 1 – 850 °C, 2 – 800 °C, 3 – 750 °C

Кінетика зміни маси двофазних ( $\alpha+\beta$ ) титанових сплавів BT14 та BT19

Взаємодія титанових сплавів BT14 та 19 з вуглецевмісним газовим середовищем за залишкового тиску  $P = 0,106$  Па характеризується монотонним збільшенням маси зразків за досліджуваних температур та тривалості (рис. 3). Кінетика взаємодії сплаву BT14 наближається до відповідної для сплаву BT1-0. Кінетика взаємодії сплаву BT19 відрізняється втратою маси зразками під час нагрівання у вакуумі.

Таблиця 2

**Зміна параметрів кристалічної ґратки титану в різних сплавах у результаті взаємодії з розрідженим вуглецевмісним газовим середовищем / Change of parameters of crystal lattice of the different titanium alloys as result of interaction with rarefied carbon-containing gaseous medium**

Сплав	Режим ХТО		Параметр, Å		$c/a$
	$T, ^\circ\text{C}$	Тривалість год.	$a$	$c$	
VT1-0	Вихідний стан		2,9481	4,6842	1,5888
	750	1	2,9550	4,6970	1,5895
		3	2,9511	4,6960	1,5913
		5	2,9500	4,6970	1,5922
	800	1	2,9500	4,7020	1,5939
		3	2,9460	4,6970	1,5944

	850	5	2,9400	4,6960	1,5973	
		1	2,9540	4,7000	1,5911	
		3	2,9552	4,6963	1,5891	
		5	2,9480	4,6960	1,5929	
VT5-1	Вихідний стан		2,9286	4,6746	1,5961	
	750	1	2,9353	4,6943	1,5993	
		3	2,9290	4,6930	1,6023	
		5	2,9328	4,6912	1,5996	
	800	1	2,9409	4,6964	1,5969	
		3	2,9374	4,6914	1,5971	
		5	2,9350	4,6940	1,5993	
	850	1	2,9370	4,6970	1,5993	
		3	2,9353	4,6963	1,5999	
		5	2,9419	4,6963	1,5963	
	ПТ-7М	Вихідний стан		2,9484	4,6934	1,5918
		750	1	2,9513	4,6980	1,5918
3			2,9468	4,6982	1,5943	
5			2,9499	4,6970	1,5923	
800		1	2,9495	4,7020	1,5942	
		3	2,9490	4,6960	1,5924	
		5	2,2950	4,6970	1,5922	
850		1	2,9486	4,6963	1,5927	
		3	2,9490	4,6980	1,5931	
		5	2,9506	4,6942	1,5909	

Закінчення таблиці 3						
1	2	3	4	5	6	
VT14	Вихідний стан		2,9360	4,6800	1,5940	
	750	1	2,9369	4,6895	1,5968	
		3	2,9360	4,6830	1,5950	
		5	2,9344	4,6850	1,5966	
	800	1	2,9367	4,6886	1,5966	
		3	2,9340	4,6840	1,5965	
		5	2,9335	4,6812	1,5958	
	850	1	2,9350	4,6840	1,5959	
		3	2,9320	4,6770	1,5952	
		5	2,9339	4,6774	1,5943	
	VT19	Вихідний стан		2,9421	4,6029	1,5645
		750	1	2,9390	4,6970	1,5982
3			2,9350	4,6930	1,5990	
5			2,9390	4,6970	1,5982	
800		1	2,9442	4,7013	1,5968	
		3	2,9421	4,6840	1,5921	
		5	2,9390	4,6880	1,5951	
850		1	2,9484	4,6869	1,5897	
		3	2,9442	4,6465	1,5782	
		5	2,9450	4,6400	1,5756	

**Наукова новизна та практична значимість**

У статті вперше наведено результати експериментальних досліджень, якими встановлено, що взаємодія за високих температур ( $T = 750 \dots 850 \text{ }^\circ\text{C}$ ) титанових сплавів із розрідженим вуглецевмісним газовим середовищем ( $\text{Ar} + 16,7\% \text{ C}_3\text{H}_8$ ) за тиску  $P = 0,106 \text{ Па}$  спричинює збільшення маси зразків за законом, що наближається до лінійного, що свідчить про контролювальну стадію взаємодії – реакцій на межі газ – метал. Практичною значимістю отриманих результатів слугує те, що високотемпературна взаємодія титанових сплавів із вуглецевмісним газовим середовищем супроводжується спотворенням кристалічної ґратки поверхневого шару металу, що повинно відповідним чином вплинути на фізико-механічні властивості приповерхневого шару металу.

**Висновки**

Експериментально досліджено вплив хіміко-термічної обробки у вуглецевмісному газовому середовищі за різних температурних ( $T = 750, 800, 850 \text{ }^\circ\text{C}$ ) та часових ( $\tau = 1, 3, 5 \text{ год.}$ ) параметрів на титанові сплави різних структурних класів. Установлено, що взаємодія за високих температур ( $T = 750 \dots 850 \text{ }^\circ\text{C}$ ) титанових сплавів із розрідженим вуглецевмісним газовим середовищем ( $\text{Ar} + 16,7\% \text{ C}_3\text{H}_8$ ) за тиску  $P = 0,106 \text{ Па}$  викликає збільшення маси зразків за законом, що наближається до лінійного, що свідчить про контролювальну стадію взаємодії – реакцій на межі газ – метал. Високотемпературна взаємодія титанових сплавів із вуглецевмісним газовим середовищем супроводжується спотворенням кристалічної ґратки

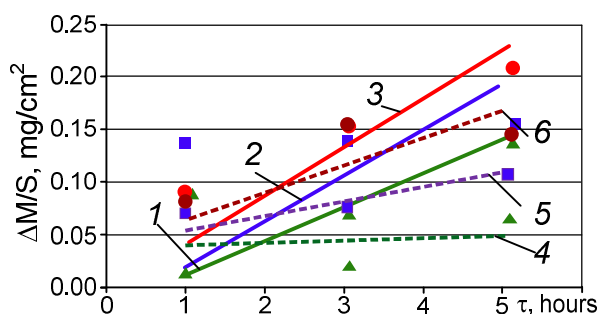


Рис. 3. Кінетика зміни маси зразків титанових сплавів VT14 (а) та VT19 (б) в аргон-пропановій суміші  $P = 0,106 \text{ Па}$  за різних температур: 1,4 – 750 °C; 2,5 – 800 °C; 3,6 – 850 °C /

Fig. 3. Kinetics of change of mass of specimens of (a) VT14 (1, 2, 3) and VT19 (4, 5, 6) titanium alloys in argon-propane mixture at  $P = 0.106 \text{ Pa}$  under different temperatures: 1, 4 – 750 °C; 2, 5 – 800 °C; 3, 6 – 850 °C

Таблиця 3

**Зміна параметрів кристалічної ґратки титану в сплаві VT14 та VT19 в результаті взаємодії з розрідженим вуглецевмісним газовим середовищем / Change of parameters of crystal lattice of the different VT14 та VT19 titanium alloys as result of interaction with rarefied carbon-containing gaseous medium**

Сплав	Режим ХТО		Параметр, Å		c/a
	T, °C	Тривалість, год.	a	c	
1	2	3	4	5	6

поверхневого шару металу титанових сплавів унаслідок дифузійного розчинення вуглецю.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Leyens C. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications / C. Leyens, M. Peters. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Germany. – 2003.
2. Oshida Y. Bioscience and bioengineering of titanium materials / Y. Oshida // Elsevier. – 2007. – 430 p.
3. Lutjering G. Titanium / G. Lutjering, James C. Williams: 2nd edition. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2007. – 438 p.
4. Moiseyev V. N. Titanium Alloys. Russian aircraft and aerospace applications / V. N. Moiseyev. – London-New York-Singapore: Taylor & Francis Group, 2006. – 207 p.
5. Sha W. Titanium alloys: modeling of microstructure, properties and applications / W. Sha, S. Malinov. – 2009. – Woodhead Publishing Limited. – 569 p.
6. Fukai H. The effects of the oxygen-enriched surface Layer on mechanical properties of  $\alpha + \beta$  type titanium alloys / H. Fukai, H. Iizumi, K. Minarawa, Ch. Ouchi // ISIJ International. – 2005. – Vol. 45 (1). – Pp. 133–141.
7. Fedirko V. M. Influence of the Diffusion Saturation with Oxygen on the Durability and Long-Term Static Strength of Titanium Alloys / V. M. Fedirko, O. G. Luk'yanenko, V. S. Trush // Materials science. – 2014. – Vol. 50, iss. 3. – Pp. 415–420.
8. Fedirko V. M. Increasing the serviceability of products from single-phase titanium alloys by thermochemical treatment / V. M. Fedirko, A. G. Luk'yanenko, I. M. Pohrelyuk, V. S. Trush // Materials Performance and Characterization. – 2017. – Vol 6(4). – Режим доступу : <https://doi.org/10.1520/MPC20160071>.
9. Trush Vasyl. Thermodynamic prerequisites formation of compounds of titanium with interstitial elements (C, N, O, B) depending on a temperature and pressure of gaseous medium / Vasyl Trush, Alexander Luk'yanenko // Scientific Journal of the TNTU. – №3 (91). – 2018. – Pp. 16–25.

### REFERENCES

1. C. Leyens and M. Peters. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Germany, 2003.
2. Oshida Y. Bioscience and bioengineering of titanium materials, Elsevier, 2007, 430 p.
3. Lutjering G. and Williams J.C. Titanium : 2nd edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 438 p.
4. Moiseyev V.N. Titanium Alloys. Russian aircraft and aerospace applications. London-New York-Singapore : Taylor & Francis Group, 2006, 207 p.
5. Sha W. and Malinov S. Titanium alloys: modeling of microstructure, properties and applications. 2009, Woodhead Publishing Limited, 569 p.
6. Fukai H., Iizumi H., Minarawa K. and Ouchi Ch. The effects of the oxygen-enriched surface Layer on mechanical properties of  $\alpha + \beta$  type titanium alloys. ISIJ International, 2005, vol. 45 (1), pp. 133–141.
7. Fedirko V.M., Luk'yanenko O.G. and Trush V.S. Influence of the Diffusion Saturation with Oxygen on the Durability and Long-Term Static Strength of Titanium Alloys Materials science. 2014, vol. 50, iss. 3, pp. 415–420.
8. Fedirko V.M., Luk'yanenko A.G., Pohrelyuk I.M. and Trush V.S. Increasing the serviceability of products from single-phase titanium alloys by thermochemical treatment, Materials Performance and Characterization. 2017, vol 6(4).
9. Vasyl Trush and Alexander Luk'yanenko. Thermodynamic prerequisites formation of compounds of titanium with interstitial elements (C, N, O, B) depending on a temperature and pressure of gaseous medium. Scientific Journal of the TNTU, no. 3 (91), 2018, pp. 16–25.

*Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук М. М. Студентом (Україна), д-ром техн. наук, проф. О. І. Балицьким (Україна).*

Надійшла до редакції 01.04.2018

Прийнята до друку 09.04.2018