

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗЧИНЕННЯ ЧАСТИНОК ДІОКСИДУ ТИТАНУ В РОЗПЛАВІ ТИТАНУ

С.В. Ахонін, О.Г. Єрохін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Побудовано математичну модель процесу розчинення кисневмісних включень титану в розплаві титанових сплавів, яка дозволяє розрахувати залежність швидкості розчинення частинок від температури розплаву. Встановлено динаміку розподілу кисню в частинках  $\alpha$ -титану в процесі розчинення. Визначено часові проміжки повного розчинення кисневмісних включень титану різного хімічного складу та початкових розмірів. Бібліогр. 20, рис. 6.

*Ключові слова:* титан; діоксид титану; дифузія; розчинення; математичне моделювання

**Вступ.** Незважаючи на унікальні властивості титану як конструкційного матеріалу, широкому застосуванню титанових сплавів в різних галузях промисловості заважає висока собівартість його виробництва [1]. Одним з перспективних шляхів вирішення цього питання є розробка та використання економнолегованих титанових сплавів, в яких дорогі легуючі елементи замінені недорогими та доступними, а саме — киснем, залізом, вуглецем тощо [2, 3], які забезпечують найбільший приріст міцності в титанових сплавах. Серед цих елементів кисень забезпечує найкраще співвідношення міцності та пластичності титану. В області малих концентрацій (до 0,6 мас. %) кожна десята частка відсотка кисню підвищує межу міцності і текучості титану приблизно на 125 МПа при відносно невеликому падінні пластичних властивостей [4]. Разом з тим при концентраціях кисню більше 0,7 мас. % титан повністю втрачає здатність до пластичної деформації [5].

На сьогодні основними способами промислового виробництва титанових сплавів є технології вакуумно-дугового переплаву (ВДП) та електронно-променевої плавки (ЕПП) [6], при яких легуючі компоненти вводяться в сплави на етапі формування витратної шихти. Особливістю такого легуючого елемента як кисень є його існування у вигляді газу, тому в витратну шихту його вводять у вигляді частинок діоксиду титану [7, 8]. Але температура конгруентного плавлення діоксиду титану з вмістом кисню 40 мас. % складає 1870 °C [9]. При виробництві зливків титану різними способами плавок перегрів розплаву вище за температуру плавлення титану (1670 °C) і час перебування металу в рідкому стані обмежені, тому необхідно

вивчити механізми та закономірності поведінки частинок діоксиду титану в процесі плавки.

Особливо слід відзначити важливість повного розчинення частинок діоксиду титану в процесі плавки, так як тугоплавкі частинки  $\text{TiO}_2$ , що не розчинилися, являють собою один з критичних типів дефектів титанових напівфабрикатів [10]. Твердість цих частинок значно перевищує твердість титанової матриці, тому вони є концентраторами напруги та джерелами зародження втомних тріщин, що призводять до руйнування деталей відповідального призначення і, як наслідок, катастрофічним аваріям.

**Фізична модель.** Метою цієї роботи є вивчення закономірностей розчинення частинок діоксиду титану в розплаві титану за допомогою методів математичного моделювання.

Механізм розчинення частинок діоксиду титану в розплаві титану аналогічний до процесів розчинення частинок нітриду титану [11–13] і визначається процесами дифузії кисню в діоксиді титану та самому титані, а також структурно-фазовими перетвореннями в титані. Так як вміст кисню в розплаві титану невеликий і згідно з вимогами стандартів не перевищує 0,35 %, то при попаданні в розплав частинок діоксиду титану кисень починає дифундувати із частинки в розплав. Внаслідок дифузії концентрація кисню в поверхневих шарах частинки знижується. При зниженні концентрації кисню приблизно до 15 % згідно з діаграмою стану (рис. 1) діоксид титану перетворюється на  $\alpha$ -титан, який у міру подальшого зниження концентрації кисню перетворюється на  $\beta$ -титан, температура плавлення якого нижче, ніж температура плавлення діоксиду титану та  $\alpha$ -титану.

С.В. Ахонін — <http://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, О.Г. Єрохін — <http://orcid.org/0000-0003-2105-5783>

© С.В. Ахонін, О.Г. Єрохін, 2022

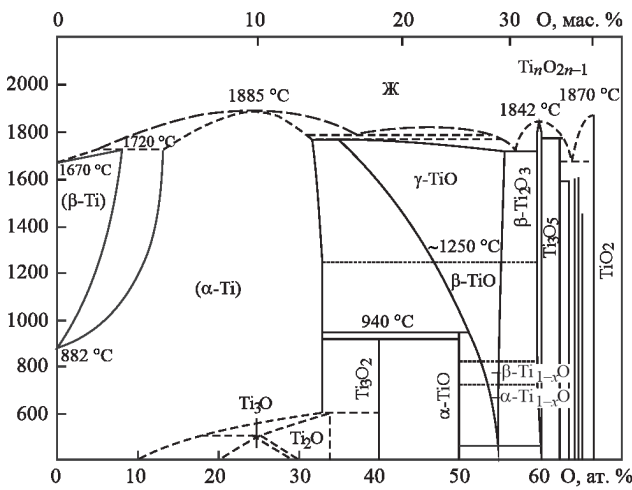


Рис. 1. Діаграма стану системи титан–кисень

Таким чином, процес розчинення включення може бути представлений в такий спосіб. Після потрапляння включення в розплав титану атоми кисню починають переходити з поверхні включення в розплав і після проходження приграничного дифузійного поля виноситися в об’єм рідкого металу конвективними потоками. На місце атомів кисню, що пішли з поверхні, з об’єму включення дифундуватимуть нові атоми. При цьому вміст кисню в поверхневих шарах включення буде знижуватися. Коли концентрація кисню в поверхневому шарі твердої частинки стане менше концентрації, що відповідає лінії ліквідус при даній температурі, цей шар розчиниться і розміри включення зменшаться.

**Математична модель.** Для визначення закономірностей розчинення частинок діоксиду титану в розплав титану скористаємося математичною моделлю розчинення кисневмісних тугоплавких включень титану в розплав титану [14]. Вважатимемо, що частинка діоксиду титану, поміщена в розплав титану, має форму кулі радіуса  $R_{in}$ , а її температура дорівнює температурі розплаву  $T_{in}$ . У цьому випадку рівняння дифузії кисню у включенні у сферичній системі координат матиме вигляд:

$$\frac{\partial C_O}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_O r^2 \frac{\partial C_O}{\partial \tau} \right), \quad (1)$$

де  $r$  — поточний радіус в межах від 0 до  $R_{in}$ , м;  $C_O = C_O(r, \tau)$  — концентрація кисню у включенні, %;  $D_O = D_O(C_O)$  — коефіцієнт дифузії кисню у твердій частинці, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  — час з моменту початку процесу розчинення, с.

Гранична умова у центрі частинки визначається умовами симетричності:

$$\left. \frac{\partial C_O}{\partial r} \right|_{r=0} = 0. \quad (2)$$

Так як після проходження приграничного дифузійного шару в розплав атоми кисню відносяться в об’єм рідкого металу конвективними потоками, то гранична умова на поверхні включення матиме вигляд:

$$-D_O \left. \frac{\partial C_O}{\partial r} \right|_{r=R_{in}} = \beta_O \left( C|_{r=R_{in}} - LC_O^L \right), \quad (3)$$

де  $\beta_O$  — коефіцієнт масопередачі кисню у розплав титану, м/с;  $L$  — рівноважний коефіцієнт розподілу кисню між твердою та рідкою фазами;  $C_O^L$  — концентрація кисню в об’ємі розплаву, %. У першому наближенні рівноважний коефіцієнт розподілу кисню між фазами  $L$  можна прийняти рівним 1,5 і вважати постійним [8].

Початковий розподіл концентрації кисню в об’ємі включення приймемо постійним:

$$C_O(r, 0) = 40 \%. \quad (4)$$

Для чисельного розв’язання математичної моделі (1)–(4) скористаємося кінцево-різницевою методом Кранка–Ніколсона [15]. Апроксимацію рівняння (1) проведемо за неявним шеститочковим шаблоном, який забезпечує безумовну стійкість і збіжність чисельного рішення.

Процес розчинення включення в програмі реалізований шляхом аналізу значень концентрацій після кожного кроку за часом і зменшення робочого масиву на кількість точок, в яких концентрація кисню менше концентрації, що відповідає лінії ліквідус при розрахунковій температурі.

При визначенні коефіцієнта дифузії кисню в титані необхідно враховувати, що його величина суттєво залежить від форми кристалічних ґрат титану. Так як дифузія є активаційним процесом, то температурні залежності коефіцієнтів дифузії можна виразити в експоненційному вигляді. Усреднення результатів експериментальних робіт щодо визначення коефіцієнта дифузії кисню в титані [16–18] дозволило отримати такі температурні залежності:

$$D_O^a = 3,45 \exp \left\{ -\frac{211901}{RT} \right\}, \quad (5)$$

$$D_O^b = 0,89 \exp \left\{ -\frac{173861}{RT} \right\}. \quad (6)$$

Відповідно до результатів експериментальних досліджень, наведених у роботах [19, 20], температурна залежність коефіцієнта дифузії кисню в діоксиді титану має такий вигляд:

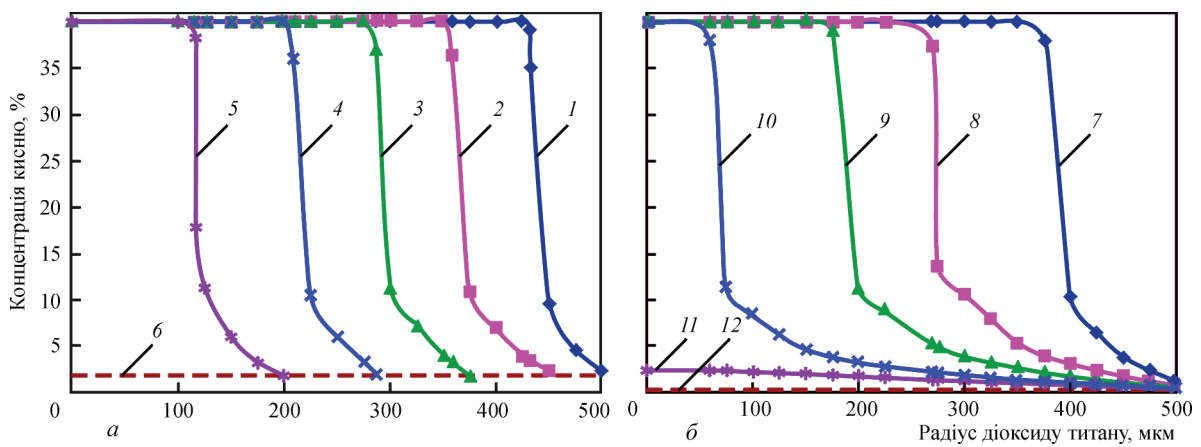


Рис. 2. Розподіл концентрації кисню в частинці діоксиду титану в залежності від часу, с: 1 — 6; 2 — 18; 3 — 30; 4 — 42; 5 — 54; 6 — АС1 = 1,69 %; 7 — 18; 8 — 48; 9 — 78; 10 — 108; 11 — 120; 12 — АС1 = 0,256 % та при температурах 2000 (а) та 1950 К (б)

$$D_O^{\gamma} = 1,1 \exp \left\{ -\frac{305870}{RT} \right\}. \quad (7)$$

У програмі, що реалізує чисельне рішення математичної моделі (1)–(4), коефіцієнт дифузії визначався в кожній точці за вмістом кисню в цій же точці на попередньому кроці часу, тобто при заданій температурі розрахунку та обчисленої концентрації кисню за діаграмою стану визначали фазовий склад титану і потім за формулами (5), (6) або (7) обчислювали відповідно значення коефіцієнта дифузії. При цьому вважали, що у двофазних зонах, наприклад  $\alpha+\beta$ , коефіцієнт дифузії змінюється лінійно зі зменшенням концентрації відповідно від  $D_O^{\alpha}$  до  $D_O^{\beta}$ .

Виконані в роботі [13] розрахунки дозволили отримати для чисельного значення коефіцієнта масопереносу кисню у розплаві титану наступну оцінку —  $\beta_0 = 0,01$  см/с.

**Закономірність розчинення частинок діоксиду титану.** Дослідження динаміки розподілу кисню в об’ємі включення за допомогою математичної моделі (1)–(4) показало, що характер розчинення частинки діоксиду титану істотно залежить від температури розплаву. При температурі 2000 К по всьому об’єму включення, за винятком вузького шару на границі розділу фаз, концентрація кисню постійна, а в приповерхневому шарі товщиною близько 100 мкм спостерігається різке зменшення вмісту кисню від його вихідного вмісту до концентрації, відповідної лінії АС1 (лінії ліквідус) при даній температурі (рис. 2, а), причому зниження концентрації кисню з 40 до 12...13 % відбувається в підшарі завтовшки всього 2...3 мкм. З часом зовнішні шари включення (з низьким вмістом кисню) розчиняються, а градієнт концентрації приблизно постійної форми, у міру розчинення частинки, переміщається до центру включення разом із поверхнею розділу фаз.

При температурі 1950 К розподіл кисню в об’ємі включення має такий же характер, що і при 2000 К, проте розчинення частинки не відбувається аж до зниження концентрації кисню в центрі частки до 10 %, після чого частка впродовж 20 с розчиняється (рис. 2, б).

Аналіз залежності радіусу частинки діоксиду титану від часу перебування в розплаві (рис. 3) показує, що при температурі 2000 К частинка діоксиду титану розчиняється практично з постійною швидкістю (швидкість переміщення міжфазної поверхні становить 7,1...7,5 мкм/с) і лише на останньому етапі швидкість розчинення збільшується до 22 мкм/с. При температурі 1950 К на початковому етапі розчинення розміри частинки діоксиду титану залишаються практично незмінними, а потім розчиняються з середньою швидкістю до 25 мкм/с.

Побудована математична модель (1)–(4) дозволяє визначити закономірності розчинення частинок діоксиду титану при різних переplавних процесах спеціальної електрометалургії шляхом побудови залежності часу повного розчинення включення від температури рідкого титану для

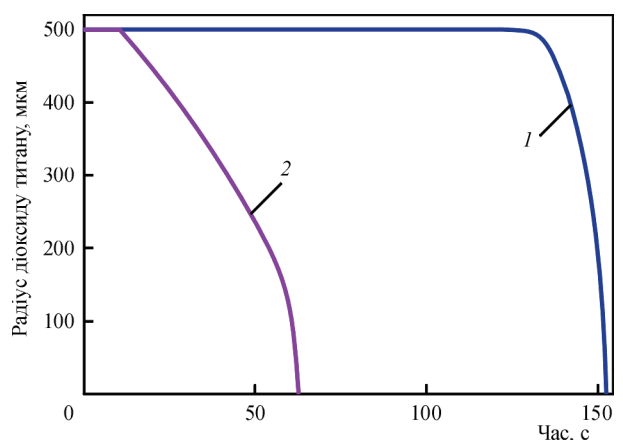


Рис. 3. Залежність радіусу частинки діоксиду титану від часу перебування у розплаві при температурах 1950 (1) та 2000 К (2)

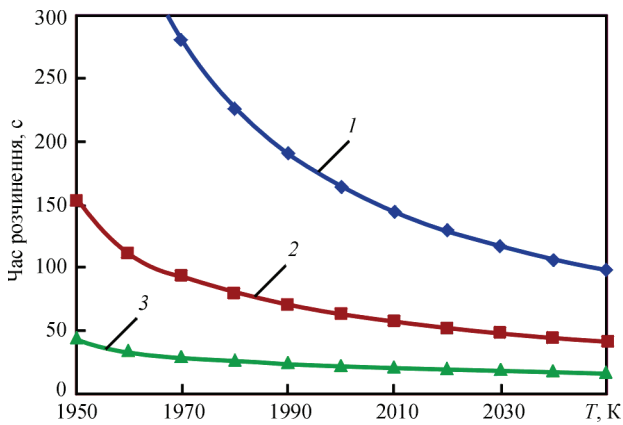


Рис. 4. Залежність часу розчинення частинки діоксиду титану від температури при різних розмірах включення, мм: 1 — 2; 2 — 1; 3 — 0,5

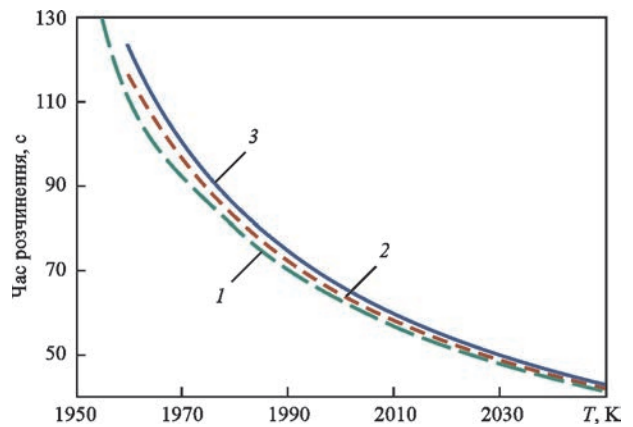


Рис. 6. Залежність часу розчинення частинок діоксиду титану від температури при різних концентраціях кисню [O] в розплаві, %: 1 — 0,15; 2 — 0,20; 3 — 0,25

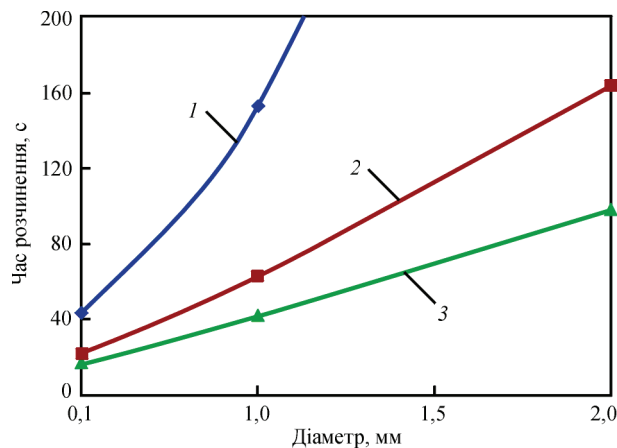


Рис. 5. Залежність часу розчинення частинок діоксиду титану від діаметра при різних температурах, К: 1 — 1950; 2 — 2000; 3 — 2050

частинок різного розміру та різного вмісту кисню в розплаві.

Вплив температури рідкого титану на час розчинення частинок діоксиду титану дуже суттєвий і зі зростанням температури час існування включення у розплаві різко скорочується (рис. 4). Так, наприклад, для частинки  $TiO_2$  діаметром 1 мм збільшення перегріву розплаву на 100 К (з 1950 до 2050 К) зменшує тривалість розчинення включення майже вчетверо — з 2,5 хв до 41 с.

Час існування включення  $TiO_2$  в рідкому титані істотно залежить від його лінійних розмірів (рис. 5), причому ступінь цієї залежності зростає при зниженні температури. Якщо при температурі розплаву 2000...2050 К збільшення або зменшення діаметра включення в два рази відповідно збільшує або зменшує час розчинення в 2,5 рази, то при температурі розплаву 1950 К збільшення або зменшення діаметра включення в два рази відповідно збільшує або зменшує час розчинення в 3,5 рази.

Концентрація кисню в розплаві титану на час розчинення включення впливає незначно (рис. 6), за винятком випадку невеликого перегріву розпла-

ву вище температури плавлення титану. В останньому випадку рівноважна концентрація кисню на поверхні твердої частинки може наблизитися або навіть перевершувати рівноважну концентрацію кисню лінії АС1 діаграми стану системи титан-кисень (лінія ліквідус). При цьому час розчинення включення значно зростає, процес розчинення включення може навіть зупинитися.

Таким чином, встановлені закономірності розчинення частинок діоксиду титану в рідкому титані дозволяють зробити висновок про те, що для забезпечення повного засвоєння кисню в процесі плавки з вихідної шихти, легованої порошком діоксиду титану, необхідно підвищувати температуру розплаву, зменшувати фракційний склад порошку  $TiO_2$  і не допускати його агрегування у частинки більшого розміру. Використання запропонованої математичної моделі процесу розчинення частинок діоксиду титану при ЕПП або ВДП дає можливість визначити технологічні режими плавки, що забезпечують гарантовану якість зливка як за хімічним складом, так і за відсутністю в ньому тугоплавких кисневмісних включень.

### Список літератури

- (2013) *Titanium Metal: Market Outlook to 2018*. Sixth Edition, 2013. Roskill Information Services Ltd, USA.
- Осипенко А.В. (2015) Разработка технологии получения сырья для сплавов титана из некондиционного титана губчатого. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 4(5), 28–32. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte\\_2015\\_4%285%29\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2015_4%285%29_7)
- Cheng-Lin, Li., Yang Yu, Wen-Jun Ye et al. (2015) Effect of boron addition on microstructure and property of low cost beta titanium alloy. *TMS 2015, 144<sup>th</sup> Annual Meeting & Exhibition*, 1167–1172. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48127-2\\_141](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48127-2_141)
- Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Справочник. Москва, ВИЛС-МАТИ.
- Давыдов С.И., Шварцман Л.Я., Овчинников А.В., Теслевич С.М. (2006) Некоторые особенности легирования



- титана кислородом. Ti-2006 в СНГ: *Материалы Межд. научно-техн. конф.*, 21–24 мая 2006 г., г. Суздаль, Россия. Киев, Наукова думка, сс. 253–257.
- Ахонін С.В. (2019) Тенденції розвитку спеціальної електрометалургії титану в Україні. *Вісник НАН України*, **6**, 28–36. DOI: <http://doi.org/10.15407/vsn2018.06.028>
  - Ахонін С.В., Пікулин О.М., Березос В.О. та ін. (2021) Виробництво зливків титану з регламентованим вмістом кисню способом електронно-променевої плавки. *Сучасна електрометалургія*, **3**, 13–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/sem2021.03.03>
  - Амелин А.И., Костенко В.И., Кругленко М.П., Пап П.А. (2009) Макросегрегация кислорода при кристаллизации слитков титана. *Современная электрометаллургия*, **4**, 20–24.
  - Хансен М., Андерко К. (1962) Структуры двойных сплавов. Т. 2. Москва, Металлургиздат.
  - Bellot J.P., Mitchell A. (1994) Hard- $\alpha$  particle behaviour in a titanium alloy liquid pool. *Light Metals*, **2**, 1187–1193.
  - Jarrett, R.N., Reichman, S.H, Broadwell, R.G. (1988) Defect removal mechanisms in hearth melted Ti–6Al–4V. *Proc. of Sixth World Conf. on Titanium*. Les Editions de Physique, Cedex, France, 593–598.
  - Jarrett, R.N. (1986) Removal of defects from titanium alloys with E.B.C.H.R. *Proc. of Conf. on Electron Beam Melting and Refining. State of the Art 1986*, Bakish Materials Corporation, Englewood, New Jersey, 332–346.
  - Ахонин С.В. (2001) Математическое моделирование процесса растворения нитрида титана в расплаве титана при электронно-лучевой плавке. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **1**, 20–24.
  - Ахонин С.В., Кругленко М.П., Костенко В.И. (2011) Математическое моделирование процесса растворения кислородсодержащих тугоплавких включений в расплаве титана. *Современная электрометаллургия*, **1**, 17–21.
  - Марчук Г.И. (1980) *Методы вычислительной математики*. Москва, Наука.
  - Коган Я.Д., Колачев Б.А., Левинский Ю.В. (1987) *Константы взаимодействия металлов с газами*. Справочник. Москва, Металлургия.
  - Белова С.Б., Колачев Б.А., Волков В.И. (2000) О диффузии элементов внедрения в титане. *Цветная металлургия*, **4**, 33–37.
  - Дешам М., Фельдман Р., Лэр П. (1976) Окисление титана при высокой температуре. Физическая и математическая модели. Титан: Металловедение и технология. *Сб. тр. 3-й Межд. конф. по титану. Москва, 18–21 мая 1976 г.* Т. 2, 159–168.
  - Kofstad P. (1966) *High temperature oxidation of metals*. New-York, John Wiley and Sons, 169–178.
  - Симон Д., Бульбен Ж.М., Бардоль Ж. (1976) Изучение процесса образования тонких окисных пленок и хемосорбции кислорода в титане методами эллипсометрии, ядерного активационного анализа и микрогравиметрии. *Титан: Металловедение и технология. Сб. тр. 3-й Междунар. конф. по титану. Москва, 18–21 мая 1976 г.* Т. 2, 169–176.
  - Cheng-Lin, Li., Yang Yu, Wen-Jun Ye et al. (2015) Effect of boron addition on microstructure and property of low cost beta titanium alloy. In: *TMS 2015, 144<sup>th</sup> Annual Meeting & Exhibition*, 1167–1172. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48127-2\\_141](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-48127-2_141)
  - Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
  - Davydov, S.I., Shvartsman, L.Ya., Ovchinnikov, A.V., Teslevich, S.M. (2006) Some peculiarities of titanium alloying with oxygen. In: *Proc. of Int. Conf. on Ti-2006 in CIS (Russia, Suzdal, 21–24 May 2006)*. Kyiv, Naukova Dumka, 253–257 [in Russian].
  - Akhonin, S.V. (2019) Tendencies for development of special electrometallurgy of titanium in Ukraine. *Visnyk NASU*, **6**, 28–36 [in Ukrainian]. DOI: <http://doi.org/10.15407/vsn2018.06.028>
  - Akhonin, S.V., Pikulin, O.M., Berezos, V.O. et al. (2021) Production of titanium ingots with regulated oxygen content by electron beam melting. *Suchasna Elektrometal.*, **3**, 13–18 [in Ukrainian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/sem2021.03.03>
  - Ameling, A.I., Kostenko, V.I., Kruglenko, M.P., Pap, P.A. (2009) Macroseggregation of oxygen in crystallization of titanium ingots. *Sovrem. Elektrometall.*, **4**, 20–24 [in Russian].
  - Khansen, M., Anderko, K. (1962) *Structures of binary alloys*. Vol. 2. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
  - Bellot, J.P., Mitchell, A. (1994) Hard- $\alpha$  particle behaviour in a titanium alloy liquid pool. *Light Metals*, **2**, 1187–1193.
  - Jarrett, R.N., Reichman, S.H, Broadwell, R.G. (1988) Defect removal mechanisms in hearth melted Ti–6Al–4V. In: *Proc. of Sixth World Conf. on Titanium*. Les Editions de Physique, Cedex, France, 593–598.
  - Jarrett, R.N. (1986) Removal of defects from titanium alloys with E.B.C.H.R. In: *Proc. of Conf. on Electron Beam Melting and Refining. State of the Art 1986*, Bakish Materials Corporation, Englewood, New Jersey, 332–346.
  - Akhonin, S.V. (2001) Mathematical modeling of process of titanium nitride dissolution in titanium melt during electron beam melting. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **1**, 20–24 [in Russian].
  - Akhonin, S.V., Kruglenko, M.P., Kostenko, V.I. (2011) Mathematical modeling of process of dissolution of oxygen-containing refractory inclusions in titanium melt. *Advances in Elektrometallurgy*, **1**, 13–18.
  - Marchuk, G.I. (1980) *Methods of computational mathematics*. Moscow, Nauka [in Russian].
  - Kogan, Ya.D., Kolachev, B.A., Levinsky, Yu.V. (1987) *Constants of interaction of metals with gases*: Refer. Book. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
  - Belova, S.B., Kolachev, B.A., Volkov, V.I. (2000) On diffusion of interstitial elements in titanium. *Tsvetnaya Metallurgiya*, **4**, 33–37 [in Russian].
  - Desham, M., Feldman, R., Ler, P. (1976) Oxidation of titanium at high temperature. Physical and mathematical models. Titanium: Materials science and technology. In: *Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Titanium (Moscow, 18–21 May 1976)*. Vol. 2, 159–168 [in Russian].
  - Kofstad P. (1966) *High temperature oxidation of metals*. New-York, John Wiley and Sons, 169–178.
  - Simon, D., Bulben, Zh.M., Bardol, J. (1976) Study of formation process of thin oxide films and oxygen chemisorption in titanium by methods of ellipsometry, nuclear activation analysis and microgravimetry. In: *Proc. of 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Titanium: Physical Metallurgy and Technology (Moscow, 18–21 May 1976)*. Vol. 2, 169–176 [in Russian].

## References

- (2013) *Titanium Metal: Market Outlook to 2018*. Sixth Edition, 2013. Roskill Information Services Ltd, USA.
- Osipenko, A.V. (2014) Development of producing of raw material for titanium alloys from substandard spongy titanium. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **4(5)**, 28–32. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte\\_2015\\_4%285%29\\_\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2015_4%285%29__7)

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF DISSOLUTION OF TITANIUM DIOXIDE PARTICLES IN THE TITANIUM MELT

S.V. Akhonin, O.G. Yerokhin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

A mathematical model of the process of dissolution of oxygen-containing inclusions of titanium in titanium alloy melt was constructed, which allows calculation of the dependence of particle dissolution rate on melt temperature. The dynamics of oxygen distribution in  $\alpha$ -titanium particles during the dissolution process was established. Time intervals of complete dissolution of oxygen-containing titanium inclusions of different chemical composition and initial dimensions were determined. Ref. 20, Fig. 6.

Key words: titanium; titanium dioxide; diffusion; dissolution; mathematical modeling

Надійшла до редакції 15.07.2022

**ПЕРЕДПЛАТА 2023**

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	280	840	1680	3360
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	280	560	1120
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	280	560	1120
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	560	1680	3360	6720

\*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

\*\* Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агентій «УКРПОШТА», «Преса», «Прес Центр», «АС Медіа» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

**Передплата на електронну версію журналів.**

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

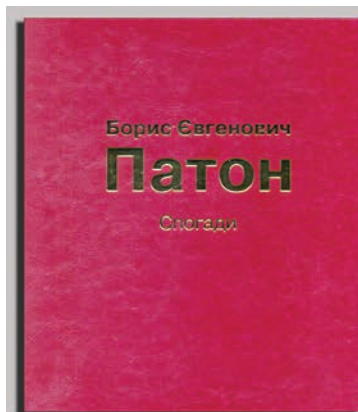
**Передплата через сайт видавництва:**

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>  
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>  
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>  
<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>  
 На сайті видавництва у 2022 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2020 рр.



**ВИДАВНИЦТВО**

Міжнародна Асоціація «Зварювання»  
 03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11  
 Тел./факс: 38044 205-23-90  
 E-mail: journal@paton.kiev.ua  
<https://patonpublishinghouse.com>



**НОВА КНИГА**

**Борис Євгенович Патон.** Спогади. — Київ: «Горобець», 2022. — 236 с. ISBN 978-966-2377-69-9.

Книга присвячена видатному ученому ХХ–ХХІ століття — академіку Борису Євгеновичу Патону. Життя цього геніального ученого і чудової, непересічної людини вмістило великі наукові відкриття в галузі матеріалознавства, металургії, зварювання та споріднених технологій, їх блискучу реалізацію в інтересах економіки і оборони країни, новаторські звершення в галузі організації науки і освіти.

Основу книги складають рукописи академіка Б.С. Патона: записки, листи, матеріали до книг про видатних учених — його колег і друзів. Другий розділ книги містить спогади співробітників Інституту електрозварювання, які мали велику честь працювати разом з цією видатною Людиною.

Замовлення на книгу надсилати на пошту:

E-mail: journal@paton.kiev.ua