

М. Ф. Григоренко, Є. П. Черніговцев, Ю. В. Найдіч\*

## ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ЗДІЙСНЕННЯ ДЕЯКИХ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ (ПЛАВКА, СИНТЕЗ СПЛАВІВ, ПАЙКА) У СЕРЕДОВИЩІ, НАБЛИЖЕНОМУ ДО АТМОСФЕРИ НА ПЛАНЕТІ МАРС

Для перевірки можливості реалізації деяких металургійних процесів у середовищі, наближеному до атмосфери на планеті Марс, проведено дослідження по плавленню ряду металів та синтезу сплавів, що широко використовуються у металургії (Cu, Ag, Sn, Pb, Ni, Cu—Ag), і вивчено змочування підкладок із сталі, нікелю та кераміки сріблом, міддю та припоями в атмосфері CO<sub>2</sub>, подібній до марсіанської. Отримані зливи металів/сплавів високої якості і дані по змочуванню свідчать про принципову можливість здійснення зазначених процесів на планеті Марс.

**Ключові слова:** металургія, плавлення, синтез металів та сплавів, пайка, змочування, марсіанська атмосфера.

### Вступ

Дослідження капілярної поведінки рідин — форми поверхонь та менісків, змочування та розтікання при контакті з твердими поверхнями за умов змінної гравітації чи її відсутності є важливим елементом розроблення космічних технологій (лиття сплавів, пайки, зварювання). У ряді попередніх робіт нами вивчався вплив як зниженої, так і підвищеної сили тяжіння на крайовий кут змочування і було встановлено його незалежність від сили тяжіння [1—4].

У даній роботі поставлено задачу експериментально, у зв'язку з підвищенням в останні роки актуальності досліджень планети Марс, оцінити можливість проведення деяких металургійних процесів (плавки, синтезу сплавів) в атмосфері, наближеній до марсіанської.

Враховуючи перспективу вже в найближчих роках (2020—2030 роки) здійснення польоту астронавтів на планету Марс (проект “Mars one” і наступні активні дослідження в цьому напрямку) і вже відомий склад атмосфери цієї планети (основа — вуглекислий газ CO<sub>2</sub>, таблиця), серед багатьох питань та проблем, у тому числі матеріалознавчого характеру, може бути розглянуте й питання щодо можливості здійснювати деякі металургійні процеси відкритого типу (тобто лише термічне нагрівання обладнання — концентроване сонячне випромінювання, печі електроопору).

Йдеться про синтез, лиття металевих сплавів, паяння—з'єднання металів і таке інше. Потреба в таких процесах (монтажно-ремонтні роботи та ін.) при довготривалій колонізації планети напевно може виникнути.

---

\* М. Ф. Григоренко — кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ; Є. П. Черніговцев — науковий співробітник цієї ж установи; Ю. В. Найдіч — академік НАН України, доктор технічних наук, професор, завідуючий відділом цієї ж установи.

## Атмосфера Марсу [5]

### Martian atmosphere [5]

Газ	CO <sub>2</sub>	Азот	Аргон	Кисень	Водяна пара	Оксид азоту	Тиск: 0,7—0,9 КПа, (0,007—0,009 атм)
Вміст, %	95,72	2,7	1,6	0,2	0,03	0,01	

Стан поверхні металу у середовищі CO<sub>2</sub> через корозійні процеси є також важливим фактором.

#### Експериментальна частина

Теоретично з точки зору термодинаміки головним критерієм взаємодії металу з оксидом вуглецю є хімічна спорідненість металу до кисню у порівнянні зі спорідненістю до кисню самого вуглецю\*, що вимірюється зміною потенціалу Гіббса  $\Delta G_0$ . На рис. 1 зображено температурну залежність  $\Delta G$  ряду металів від вмісту кисню [6]. З використанням такого підходу можливо вибрати метали (сплави), для яких середовище CO<sub>2</sub>

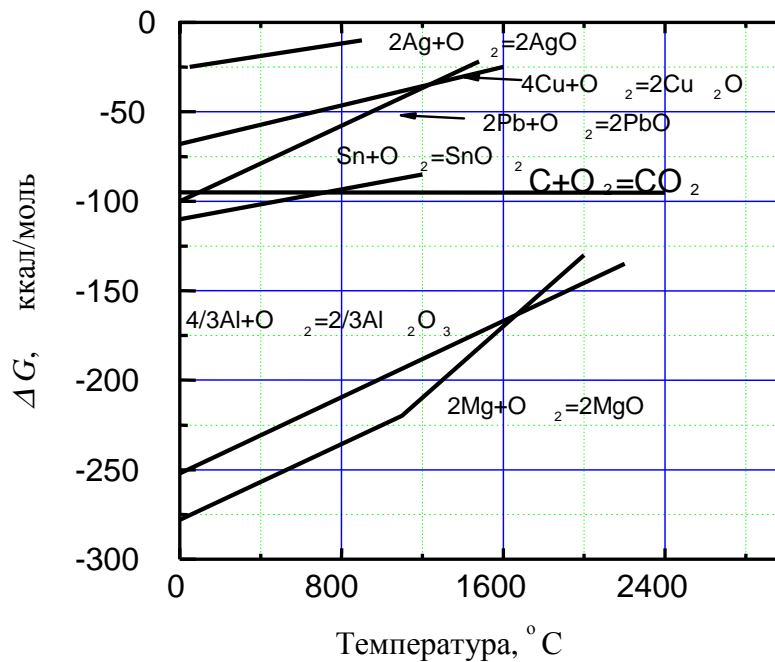


Рис. 1. Залежність величини  $\Delta G$  від температури для деяких металів [6]

Fig. 1. A plot of  $\Delta G$  vers. temperature for some metals [6]

\* Зазначимо одразу, що спочатку вивчали метали, котрі не взаємодіють з вуглецем (не утворюють стабільних карбідів, не розчиняють практично вуглець). Випробували мідь, срібло, олово, свинець та ін.

захищає поверхню розплавів від окиснення. Ці метали мають хімічну спорідненість до кисню, суттєво меншу ніж вуглець. Утворення оксидів металів Cu, Ag, Sn, Pb, Ni характеризується меншою енергією Гіббса, ніж для оксиду вуглецю (рис. 1, верхня частина), і вони можуть бути виплавлені без окиснення. Навпаки, такі метали, як, наприклад, Mg, Al, окиснюються в середовищі вуглекислого газу, що ускладнює їх виплавку.

Для проведення цих дослідів нами розроблено та створено вакуумно-газову апаратуру, обладнану засобами для відкачки та напуску вуглекислого газу (рис. 2), та виконано наземні експерименти з виплавки і лиття міді і синтезу деяких її сплавів (зокрема, Cu—Ag (72%) в атмосфері, котра моделює “марсіанські” умови).

Метал плавили у камері вакуумної установки. Зразки металів розташовували у графітовому тиглі або тиглі із оксиду алюмінію. Після відкачки високого вакууму  $\sim(3-5) \cdot 10^{-3}$  Па камеру та систему напуску “промивали” вуглекислим газом та знову відкачували. Потім у камеру напускали вуглекислий газ до потрібного тиску 0,01—0,001 МПа (контроль тиску здійснювався за допомогою манометра) і проводили нагрівання та плавку/синтез сплавів. Контролювали процес плавлення за допомогою відеокамери. У такий спосіб були отримані зливки деяких металів/сплавів (Cu, Ag, Pb, Cu—Ag, Cu—Ni) високої якості з чистою блискучою поверхнею (рис. 3).

Також досліджували змочування підкладок із сталі, нікелю та кераміки ( $\text{SnO}_2$ ) припоєм ПСР-72, сріблом та міддю (рис. 4—6).

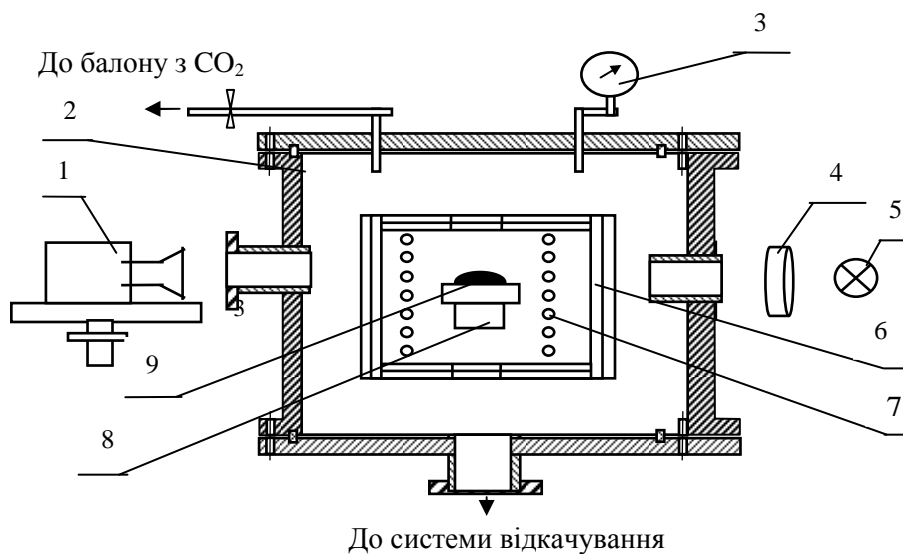


Рис. 2. Схема вакуумної установки для плавлення/синтезу металів: 1 — відеокамера; 2 — вакуумна камера; 3 — манометр; 4 — конденсор; 5 — освітлювальна лампа; 6 — екран; 7 — нагрівач; 8 — столик; 9 — підкладка (тигель) з краплею металу

Fig. 2. Vacuum apparatus diagram for metals/alloys melting/synthesis. 1 — video camera; 2 — vacuum chamber; 3 — pressure gauge; 4 — condenser; 5 — illuminating lamp; 6 — shield; 7 — heater; 8 — table; 9 — support (crucible) with a drop of metal



*a*



*б*

Рис. 3. Зливки металів/сплавів, виплавлені/синтезовані в атмосфері  $\text{CO}_2$ , наближеній до марсіанської (тиск у камері —  $\sim 0,01\text{—}0,001$  МПа): *a* — Cu (тигель із  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , маса — 40 та 15 г); *б* — сплав Cu—Ag (72%) (графітовий тигель, маса 12 г)

Fig. 3. Metal/alloy ingots melted/synthesized in a  $\text{CO}_2$  atmosphere similar to that of Mars (chamber pressure  $0,01\text{—}0,001$  MPa): *a* — Cu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  crucible, weight 40 and 15 g); *б* — Cu—Ag (72%) (graphite crucible, 12 g)



*a*

*б*

*в*

Рис. 4. Змочування підкладки із нікелю сріблом в атмосфері  $\text{CO}_2$  ( $0,01\text{—}0,001$  МПа): *a* —  $960$  °С, початок плавлення; *б* —  $980$  °С,  $\theta = 37^\circ$ ; *в* —  $1010$  °С,  $\theta = 34^\circ$

Fig. 4. Wetting of a Ni support by Ag in a  $\text{CO}_2$  atmosphere ( $0,01\text{—}0,001$  MPa): *a* —  $960$  °С, onset of melting; *б* —  $980$  °С,  $\theta = 37^\circ$ ; *в* —  $1010$  °С,  $\theta = 34^\circ$



*a*

*б*

*в*

Рис. 5. Змочування підкладки із сталі 45 припоем ПСР-72 в атмосфері  $\text{CO}_2$  ( $0,01\text{—}0,001$  МПа): *a* —  $820$  °С,  $\theta = 95^\circ$ ; *б* —  $850$  °С,  $\theta = 105^\circ$ ; *в* —  $930$  °С,  $\theta = 105^\circ$

Fig. 5. Wetting of a steel 45 support by a PSR-72 solder in a  $\text{CO}_2$  atmosphere ( $0,01\text{—}0,001$  MPa): *a* —  $820$  °С,  $\theta = 95^\circ$ ; *б* —  $850$  °С,  $\theta = 105^\circ$ ; *в* —  $930$  °С,  $\theta = 105^\circ$

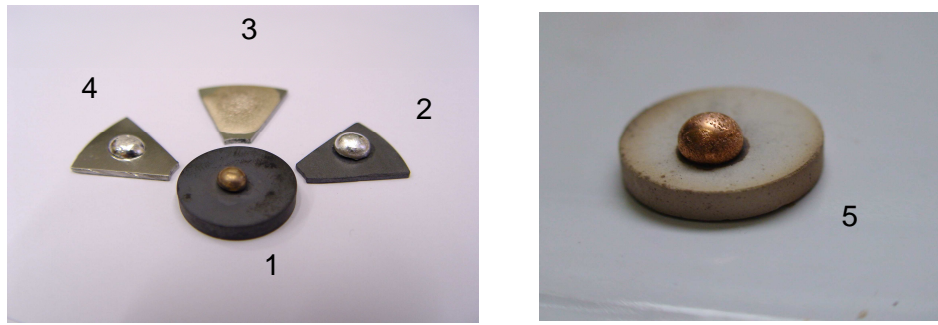


Рис. 6. Змочування сталі 45 в атмосфері  $\text{CO}_2$ : 1 — ПСР-72,  $T = 850\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 105^\circ$ ; 2 — срібло,  $T = 1100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 110^\circ$ ; у вакуумі: 3 — ПСР-72,  $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 11^\circ$ ; 4 — срібло,  $T = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 77^\circ$ ; 5 — кераміка  $\text{SnO}_2$  в атмосфері  $\text{CO}_2$  міддю,  $T = 1100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 112^\circ$

Fig. 6. Wetting of a steel 45 in a  $\text{CO}_2$  atmosphere  $\text{CO}_2$ : 1 — PSR-72,  $T = 850\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 105^\circ$ ; 2 — silver,  $T = 1100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 110^\circ$ ; in a vacuum: 3 — PSR-72,  $T = 800\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 11^\circ$ ; 4 — silver,  $T = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 77^\circ$ ; 5 —  $\text{SnO}_2$  ceramics in a  $\text{CO}_2$  atmosphere by copper,  $T = 1100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\theta = 112^\circ$

Вивчення поведінки розплавленого металу у газовому  $\text{CO}_2$ -середовищі має й наукове фізико-хімічне значення, а закономірності взаємодії з поверхнею твердого металу важливі для практики — з точки зору процесів корозії металу. Ці розробки можуть бути перспективними для розвитку космічної металургії. Роботи в цьому напрямку плануються продовжити.

### Висновки

Методом плавки у середовищі, наближеному до марсіанської атмосфери ( $\sim 96\% \text{CO}_2$ ), отримано зливки деяких металів/сплавів (Cu, Ag, Pb, Cu—Ag) високої якості. Також проведено дослідження змочування підкладок із сталі, нікелю та кераміки ( $\text{SnO}_2$ ) припоєм ПСР-72, сріблом та міддю. Отримані дані свідчать про можливість здійснення ряду металургійних процесів (виливка металів, сплавів, пайка) на планеті Марс. Можливо, що у подальшому коло використовуваних металів та сплавів буде розширене, наприклад, за рахунок застосування гетерів.

**РЕЗЮМЕ.** Для проверки возможности реализации некоторых металлургических процессов в среде, приближенной к атмосфере на планете Марс, проведены исследования по плавлению ряда металлов и синтезу сплавов, которые широко используются в металлургии (Cu, Ag, Sn, Pb, Ni, Cu—Ag), и изучена смачиваемость подложек из стали, никеля и керамики серебром, медью и припоями в атмосфере  $\text{CO}_2$ , подобной марсианской. Полученные слитки металлов/сплавов высокого качества и данные по смачиваемости свидетельствуют о принципиальной возможности осуществления указанных процессов на планете Марс.

**Ключевые слова:** металлургия, плавление, синтез металлов и сплавов, пайка, смачивание, марсианская атмосфера.

1. *Найдич Ю. В.* Форма поверхности жидкости и капиллярные явления при пониженной силе тяжести или в невесомости применительно к проблемам космического материаловедения (технологии порошковой металлургии: пропитка, жидкофазное спекание; сварка, пайка) / [Ю. В. Найдич, И. И. Габ, В. А. Евдокимов и др.] // Космічна наука і технологія. — 2004. — **10**, № 2/3. — С. 59—67.
2. *Найдич Ю. В.* Влияние гравитации на смачивание и капиллярные явления в контактных системах жидкость—твердое тело / [Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Т. В. Стецюк и др.] // Там же. — 2013. — **19**, № 5. — С. 50—55.
3. *Найдич Ю. В.* Исследование возможного действия различных уровней силы тяжести на смачивание жидкостями твердых тел. Для космического эксперимента "материал—пайка" / [Ю. В. Найдич, И. И. Габ, Т. В. Стецюк и др.] // Космічні дослідження в Україні: Звіт до COSPAR, 2014. — С. 133—137.
4. *Григоренко М. Ф.* Вивчення капілярних явищ на міжфазній поверхні рідина<sub>1</sub>—тверде тіло—рідина<sub>2</sub> з використанням модельних систем, що імітують стан мікрогравітації/невагомості / М. Ф. Григоренко, Є. П. Черніговцев // Адгезия расплавов и пайка материалов. — 2014. — Вып. 47. — С. 14—24.
5. *Атмосфера Марса* [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org>.
6. *Вакуумная металлургия* / Под ред. Р. Ф. Бунша. — М. : ИЛ, 1959. — 306 с.

Надійшла 08.11.16

**Grigorenko M., Chernigovtsev E., Naidich Yu.**

**Assessment of a possibility to carry out some metallurgical processes (melting, synthesis of alloys, brazing) in the atmosphere similar to that of Mars**

To check a possibility of realization of some metallurgical processes (melting, synthesis of alloys, brazing) in the atmosphere similar to that of Mars, some experiments on melting and synthesis were carried out for a number of metals and alloys widely used in metallurgy (Cu, Ag, Sn, Pb, Ni, Cu—Ag), and wetting of steel, nickel and ceramic supports by silver, copper and solders in the atmosphere of CO<sub>2</sub> was studied. Good quality metal/alloys ingots and also wettability data obtained may serve as an evidence of a possibility to realize in principle some metallurgical technologies in the atmosphere of Mars.

**Keywords:** *metallurgy, melting, synthesis of metals and alloys, brazing, wetting, martian atmosphere.*