

2. Лютий Р. В., Селівьорстов В. Ю., Іванов В. Г., Ямшинський М. М. Зв'язувальні матеріали для ливарних форм і стрижнів: проблеми і перспективи. Метал та лиття України. 2022. том 30, № 2 (329). – С.72-82.

URL:<https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/19/19>

3. K. Major – Gabrys. Biodegradable Materials as Foundry Moulding Sands Binders. Metalurgija. 54 (2015) 3, p. 591-593.

4. Cost Benefit Analysis for GMBOND. Technikon # 1411-146. November 2005. – 55 p.

<https://afsinc.s3.amazonaws.com/Documents/EHS/All%20CERP%20Reports/1411-146%203rd%20phase%20gmbond%20public.pdf/>.

5. Hosadyna-Kondracka M., Major-Gabryś K., Warmuzek M., Bruna M. Quality Assessment of Castings Manufactured in the Technology of Moulding Sand with Furfuryl-Resole Resin Modified with PCL Additive. Arch. Metall. Mater. 67 (2022), 2, p. 753-758.

6. S.R. Giese, G.R. Thiel, R.M. Herreid, J.D. Eastman. Influence of Protein-Based Biopolymer-Coated Olivine Core Sands on Olivine Green Sand Molding Properties. Copyright 2002 American Foundry Society. AFS Transactions 02-018. 7 p.

Горбань М. В.

(КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ)

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ СИЛЦИДУ МОЛБДЕНУ В ЯКОСТІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАСТОСУВАНЬ

E-mail: gorban.max@lil.kpi.ua

Зростаючі вимоги до матеріалів для роботи в умовах високих температур, механічних навантажень і агресивних середовищ зумовлюють потребу в нових конструкційних матеріалах. Кераміка, на відміну від металів, відповідає цим вимогам завдяки високій твердості, корозійній стійкості, електроізоляційним властивостям, низькій вазі та високій температурі плавлення [1].

Металеві силіциди мають важливі переваги для високотемпературних покриттів і мікроелектроніки: вони зберігають механічні властивості при високих температурах, мають низьку хімічну активність завдяки утворенню захисного шару SiO_2 та високу твердість [1, 2]. Проте, їм притаманні недоліки – крихкість і насичення киснем за низьких температур, що обмежує їх застосування.

Для подолання цих проблем розробляють високоентропійні силіциди, які поєднують переваги традиційних силіцидів і зменшують їх недоліки.

Перші успішні дослідження таких матеріалів (наприклад, системи $(\text{MoNbTaTiW})\text{Si}$) з'явилися у 2019 році [3]. Їхні властивості визначаються конфігураційною ентропією та умовами синтезу, що забезпечує формування стабільної монофазы з покращеними характеристиками.

Метою роботи є висвітлення основних викликів використання MoSi_2 та перспективи в розробці та покращенні цих матеріалів.

У високотемпературних умовах традиційно застосовували нікелеві сплави, придатні для роботи за температур до $1200\text{ }^\circ\text{C}$, що наближається до їх температури плавлення. Без використання систем охолодження температура в турбінах може сягати $1500\text{ }^\circ\text{C}$ [4, 5]. Із розвитком технологій у сучасних умовах температура середовища може досягати $2000\text{ }^\circ\text{C}$ [6], що унеможливорює використання традиційних нікелевих сплавів.

У зв'язку з цим було запропоновано альтернативні матеріали, зокрема вольфрам, тантал і силіцид молібдену (MoSi_2). Серед них силіцид молібдену вирізняється нижчою вартістю, кращою оброблюваністю та меншою масою порівняно з більшістю альтернатив. Порівняльні характеристики силіциду молібдену з іншими високотемпературними матеріалами наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Властивості силіцидів з температурою плавлення вище 2000 °С [6]

| Сплав | Температура плавлення, °С | Густина, г/см ³ |
|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Ta ₅ Si ₃ | 2505 | 13,4 |
| W ₅ Si ₃ | 2370 | 14,5 |
| Zr ₅ Si ₃ | 2327 | 5,99 |
| Mo ₅ Si ₃ | 2180 | 8,24 |
| Ti ₅ Si ₃ | 2130 | 4,32 |
| TaSi ₂ | 2220 | 9,1 |
| WSi ₂ | 2160 | 9,86 |
| MoSi ₂ | 2030 | 6,24 |
| MoSi ₃ | 2025 | 8,92 |

З урахуванням наведених факторів, силіцид молібдену інтенсивно досліджується та розглядається як перспективний матеріал для роботи в умовах надвисоких температур, а також характеризується високою твердістю (табл. 2).

Таблиця 2. Механічні властивості, температура плавлення та густина сплавів на основі MoSi [7, 8]

| Слав | Температура плавлення, °С | Густина, г/см ³ | Твердість, ГПа | В'язкість руйнування, МПа*м ^{1/2} |
|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|--|
| MoSi ₂ | 2030 | 6,24 | 10,50 | 2,9 |
| Mo ₅ Si ₃ | 2180 | 8,19 | 12,85 | 3,2 |
| Mo ₃ Si | 2025 | 8,97 | 11,48 | 3,5 |

Однак, силіцид молібдену має два суттєві недоліки: інтенсивне окиснення за високих температур і крихкість за кімнатних умов [9].

Окрихчення відбувається за таким механізмом: на початковому етапі взаємодії з киснем формується шар аморфного діоксиду кремнію. Цей процес можна подати у вигляді реакції:



Подальший розвиток окиснення відбувається внаслідок дифузії атомів молібдену й кремнію до поверхні та проникнення кисню вглиб матеріалу. У результаті руйнування зв'язків молібден і кремній утворюють оксиди, що призводить до корозії матеріалу [10].

В 2019 році було успішно синтезовано дисиліцид молібдену з високою ентропією $(\text{Mo}_{0,2}\text{Nb}_{0,2}\text{Ta}_{0,2}\text{Ti}_{0,2}\text{W}_{0,2})\text{Si}_2$. Він має гексагональну структуру, що представляє нове сімейство матеріалів з високою ентропією (силіциди з високою ентропією) та нову некубічну кристалічну структуру. За результатами дослідження Joshua Gild «A high-entropy silicide: $(\text{Mo}_{0,2}\text{Nb}_{0,2}\text{Ta}_{0,2}\text{Ti}_{0,2}\text{W}_{0,2})\text{Si}_2$ » [3] демонструє високу нанотвердість $16,7 \pm 1,9$ ГПа та твердість за Віккерсом $11,6 \pm 0,5$ ГПа, але теплопровідність впала ($6,9 \pm 1,1$ Вт м⁻¹ К⁻¹), що майже на порядок менше, ніж у традиційно використовуваного MoSi_2 [11]. Це дослідження демонструє, що оптимального рішення для вирішення викликів застосування MoSi_2 не було знайдено, і навіть високоентропійні сплави на основі дисиліциду молібдену потребують подальшого вивчення.

Силіцид молібдену є перспективним матеріалом, який був перевірений часом. Але в умовах сучасності його недоліки не дають змогу його повноцінно використовувати, тому дослідження можливого вдосконалення даного матеріалу є перспективними. Одним із напрямків усунення недоліків є синтез високоентропійних силіцидів.

У подальших дослідженнях важливо акцентувати увагу на оксидній стійкості, оскільки у силіцидів є властивість окрихчуватися під час насичення киснем, що може бути катастрофічним під час експлуатації.

Література:

1. Introduction to Ceramics / W. D. Kingery et al. Journal of The Electrochemical Society. 1977. Vol. 124, no. 3. P. 152C.
2. Petrovic J. J., Vasudevan A. K. Key developments in high temperature structural silicides. Materials Science and Engineering: A. 1999. Vol. 261, no. 1-2. P. 1–5.
3. A high-entropy silicide: $(\text{Mo}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}\text{W}_{0.2})\text{Si}_2$ / J. Gild et al. Journal of Materiomics. 2019. Vol. 5, no. 3. P. 337–343.
4. International Symposium on Niobium for High Temperature Applications (2003 Araxá, Brazil). Niobium: High temperature applications : proceedings of the International Symposium on Niobium for High Temperature Applications : held in Araxa, MG, Brazil, December 1-3, 2003. Warrendale, Pa : TMS, 2004. 280 p.
5. Study of microstructure of nickel-based superalloys at high temperatures / Q. Zhang et al. Scripta Materialia. 2017. Vol. 126. P. 55–57.
6. A Review of Mo-Si Intermetallic Compounds as Ultrahigh-Temperature Materials / L. Jiang et al. Processes. 2022. Vol. 10, no. 9. P. 1772.
7. Phase-microstructure of Mo/Si nanoscale multilayer and intermetallic compound formation in interfaces / N. Kumar et al. Intermetallics. 2020. Vol. 125. P. 106872.
8. Solid solution hardening and softening in MoSi_2 alloys / A. A. Sharif et al. Scripta Materialia. 2001. Vol. 44, no. 6. P. 879–884.
9. Temperature Resistance of Mo_3Si : Phase Stability, Microhardness, and Creep Properties / O. Kauss et al. Metals. 2021. Vol. 11, no. 4. P. 564.
10. Low temperature oxidation behavior of a MoSi_2 -based material / J. Chen et al. Materials Science and Engineering: A. 1999. Vol. 261, no. 1-2. P. 239–244.
11. Raju G. B., Basu B. Densification, Sintering Reactions, and Properties of Titanium Diboride With Titanium Disilicide as a Sintering Aid. Journal of the American Ceramic Society. 2007. Vol. 90, no. 11. P.