

4. Behrens B.-A., Bouguecha A., Lüken I., Mielke J., Bistron M. 5.11 - Tribology in Hot Forging, Editor(s): Saleem Hashmi, Gilmar Ferreira Batalha, Chester J. Van Tyne, Bekir Yilbas, Comprehensive Materials Processing, Elsevier, 2014. P. 211-234.
5. Maldzinski L., Tacikowski J., 12 - ZeroFlow gas nitriding of steels, Editor(s): Eric J. Mittemeijer, Marcel A.J. Somers, Thermochemical Surface Engineering of Steels, Woodhead Publishing, 2015. P. 459-483.
6. Sharma G.K., Pant P., Jain P.K., Kankar P.K., Tandon P. (2022). Numerical and experimental analysis of heat transfer in inductive conduction based wire metal deposition process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 236, no. 5, pp. 2395-2407.
7. Bao L., Wang B., You X., Li H., Gu Y., Liu W. (2020). Numerical and experimental research on localized induction heating process for hot stamping steel sheets. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 151, art. no. 119422.
8. Мохорт А.В., Чумак М.Г. Термічна обробка металів. Київ: Вид-во Либідь, 2002. 512 с.
9. Xiaohu D., Dong-ying Ju, Min L. (2017). Finite Element Modeling and Experimental Verification of Nitriding Process in S30C Steel. Materials Research. 20. 10.1590/1980-5373-mr-2016-0531.

ОБ'ЄМНІ НАНОКРИСТАЛІЧНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ МІДІ

*Гречанюк В.Г.^{1,2}, Шаповалов В.О.², Гречанюк І.М.¹,
Гречанюк М.І.³, Маценко О.В.¹*

¹Київський національний університет будівництва та архітектури,

²Інститут електрозварювання ім С. О.Патона,

³Інститут проблем матеріалознавства НАН України

E-mail: ¹eltechnic777@ukr.net

Структура конденсованих композиційних матеріалів (ККМ) істотно залежить від концентрації зміцнюючої фази, температури осадження та інших технологічних параметрів. Введення другої фази у певних концентраційних діапазонах дозволяє отримувати шаруваті (мікрошарові) матеріали на основі міді та молібдену з розміром зерна $\cong 1$ мкм [1-3]. Подальше диспергування структури при температурах підкладки 700-900°C не можливе через неоднорідність градієнтних ККМ і розпад мікрошарів товщиною менше 1 мкм.

Отримання об'ємних нанокристалічних матеріалів на основі міді та молібдену при підвищених температурах конденсації з прийнятним комплексом фізико-хімічних та механічних властивостей є можливим при виконанні певних (обов'язкових) умов стабілізації наноструктури .

До них слід зарахувати:

- забезпечення однорідності хімічного складу компонентів в об'ємі конденсату;
- зміцнення наночастинками нанозерен матриці з метою підвищення їхньої термодинамічної стабільності;
- створення на міжфазних межах нанобар'єрних шарів, що уповільнюють процеси коалесценції нанозерен.

Небажаний в ККМ градієнт концентрації усувається шляхом застосування підкладок, що рухаються. Метод підкладок, що обертаються, з розділним випаром компонентів для отримання бінарних і багатокомпонентних сплавів заданого складу характеризується високим коефіцієнтом використання парів, а також, значною мірою, усуває стовпчасту структуру, яка іноді призводить до розтріскування і збільшення пористості.

Стовпчаста структура з використанням підкладок, що обертаються, не утворюється, оскільки кут падіння парів на підкладку постійно змінюється. Шляхом зміни геометричного розташування тиглів, швидкості обертання підкладки, швидкості випаровування компонентів можна створювати різні типи структур.

З відомих типів композиційних матеріалів, одержуваних методом випаровування-конденсації: дисперснозміцнених, мікропористих, мікрошарових найбільш перспективними для створення наноструктурних систем є мікрошарові композиції [4-5]. Формування внутрішньої наноструктури в шарах з міді і молібдену при температурах конденсації 700 °С можна очікувати, якщо їх товщини будуть менше $0,5 \div 0,6$ мкм і відсутня схильність до розпаду.

Основними технологічними факторами, що впливають на утворення шаруватої структури, є швидкість обертання підкладки і швидкість осадження компонентів, а на стабільність структури впливає товщина шарів, що чергуються, і температура конденсації. При отриманні подібних ККМ важливе значення має також геометричне розташування тиглів і підкладки щодо тиглів.

Слід зазначити, що розподіл атомів (молекул) при випаровуванні з точкового джерела за конусоїдальним законом справедливий, коли тиск пари незначний і процес випаровування не

утруднений через утворення оксидних плівок, які можуть накопичуватись на поверхні ванни, що випаровується.

У роботі визначені основні умови, за яких можливе утворення шаруватої структури з товщиною одиничного шару менше 0,5 мкм при одночасному випаровуванні-конденсації міді та молібдену на підкладку, що обертається.

На рисунку наведена схема розподілу парових потоків міді та молібдену на підкладці. Видно, що при певному геометричному розташуванні тиглів, прийнятих при розрахунках за точкові джерела випаровування, та підкладки, що обертається, існують області розподілу практично чистих металів міді та молібдену, що випаровуються.

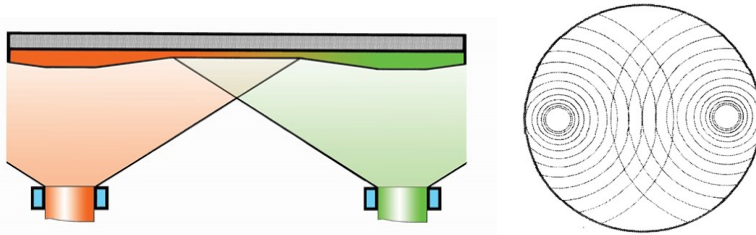


Рис. 1. Схема розподілу парового потоку при випаровуванні міді та молібдену з двох незалежних джерел: а) вид спереду; б) вид знизу

Щільність розподілу атомів міді і молібдену, що конденсуються, монотонно зменшується зі збільшенням діаметра підкладки. В результаті в певній зоні підкладки відбувається змішування парових потоків з утворенням перехідного шару між компонентами, що формують конденсат. Обертання підкладки забезпечує перехід від компонента А (міді) до компонента Б (молібдену) і навпаки. Відповідно до рисунку також можна зробити висновок, що на підкладці існують зони з мінімальною щільністю розподілу парових потоків міді та молібдену. У цих зонах найбільш ймовірно утворення оксидів і карбідів внаслідок взаємодії матеріалів, що випаровуються, з парами масла (вуглецем) вакуумних насосів і залишковою атмосферою робочої камери (кисень, азот).

Комплексний хімічний та рентгенофазовий аналіз градієнтних КМ Cu – Мо товщиною 20±30 мкм, Ø800 мм), отриманих на стаціонарній підкладці, показав, що в конденсатах з боку випаровування міді присутній молібден (0,07-0,09% мас), а з боку випаровування молібдену мідь (0,28-0,45% мас). У плівках також виявлені Zr та Y. Їх загальний вміст не перевищував 0,07% мас та

оксиди міді та молібдену CuO та MoO_3 . Їхня концентрація склала близько 3 % мас. З цього випливає, що шари, які чергуються на основі міді, складаються з малолегованого сплаву на основі міді (Cu-Zr-Y), зміцненого дисперсними частинками Mo , MoO_3 , CuO , а шари на основі молібдену містять дисперсні частинки Cu , CuO і MoO_3 . Зміцнення дисперсними частинками сприяє подрібненню структури та підвищенню термічної стабільності шарів, а плавний перехід від міді до молібдену нівелює розпад шарів при підвищених температурах конденсації та зменшує рівень напруги, обумовлений різними коефіцієнтами температурного лінійного розширення (КТЛР) міді та молібдену.

За результатами рентгенофазового аналізу структура конденсату представлена двома основними фазами: ГЦК на основі міді та ОЦК на основі молібдену кристалічними решітками. При цьому спостерігається сильне розмивання ліній молібдену і менш виражені лінії міді та їх зміщення у бік великих кутів. Зазвичай це характеризує матеріали з нанорозмірними частинками та зернами.

Для ККМ із вмістом Mo більше 5% мас характерна ієрархія шаруватої структури на мікро- та субмікронному рівні. Утворення шаруватої структури на мікрорівні обумовлено особливостями випаровування технічно чистих компонентів досліджуваних ККМ, у яких є домішки. У рідкій (що випаровується) ванні відбувається накопичення домішок. Тому на різних етапах технологічного процесу спостерігається випаровування малолегованих сплавів на основі міді та молібдену з різною концентрацією домішок. Коливання швидкості випаровування вихідних компонентів пов'язані із змінами температури на поверхні рідких ванн та наявністю оксидних плівок.

На формування структури на субмікронному рівні істотно впливає обертання підкладки, що забезпечує утворення шарів товщиною менше 0,5 μm та розпад пересичених твердих розчинів на основі міді і молібдену. Електронно-мікроскопічні дослідження на просвіт шаруватих КМ Cu-(8-12)\%мас.Мо показали, що середній розмір зерна міді коливається від 58 до 96 нм, молібдену від 46 до 62 нм. В об'ємі зерен рівномірно розподілені дисперсні частинки зміцнюючих фаз. Їх розмір коливається від 10 до 18 нм і залежить від природи фаз, що зміцнюють (оксиди, метали).

Таким чином, мікрошарувата структура сплавів на основі міді та молібдену з середнім розміром зерна міді від 58 до 96 нм і молібдену від 46 до 62 нм утворюється при вмісті молібдену до 12%.

Література

1. Grechanyuk V. G. Copper and Molybdenum-Based Nanocrystalline Materials/ Grechanyuk V. G., Grechanyuk N. I., Chornovol V. O., Kozyrev A. V. *Металофізика і новітні технології*. – 2022, 44(7), 927-942.
2. N. I. Grechanyuk Properties of Cu–Mo Materials Produced by Physical Vapor Deposition for Electrical Contacts/ Grechanyuk N. I., Konoval V. P., Grechanyuk V. G. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2021, 60(3-4), P. 183–190.
3. Grechanyuk M. I., Grechanyuk V. G., Manulyk A. M., Grechanyuk I. M., Kozyrev A. V., Gots V. I. Massive Dispersion-Strengthened Composition Materials with Metal Matrix Condensed from the Vapour Phase / *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 2022, 20(3), pp. 683–692
4. Grechanyuk M. I., Grechanyuk V. G., Shapovalov V.A., Grechanyuk I. M. Matsenko O. V., Kozyrev A. V., Gots V. I. Massive Microporous Composites Condensed from the Vapour Phase / *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, 2022, 20(4), pp. 883–894.
5. Grechanyuk N. I., Grechanyuk V. G. Precipitation-Strengthened and Microlayered Bulk Copper- and Molybdenum-Based Nanocrystalline Materials Produced by High-Speed Electron-Beam Evaporation-Condensation in Vacuum Structure and Phase Composition / *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2018, 56(11-12), 633-646

КОРОЗИЙНА СТІЙКІСТЬ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ Cu- Cr, ОТРИМАНИХ ВИСОКОШВИДКІСНИМ ВИПАРОВУВАННЯМ-КОНДЕНСАЦІЄЮ У ВАКУУМІ

*Гречанюк В. Г.^{1,2}, Гречанюк І. М.¹, Козирєв А. В.¹,
Чорновол В. О.¹, Ковальчук Ю. І.¹*

¹Київський національний університет будівництва і архітектури,

²Інститут електрозварювання ім. Є. О.Патона, м. Київ,

E-mail: eltechnic777@ukr.net

Конденсовані матеріали на основі міді, в тому числі Cu-Cr, широко застосовуються як матеріали електричних контактів [1-4]. Враховуючи, що контакти використовуються в різних галузях техніки і працюють здебільшого в різних середовищах, необхідно вивчення їх корозійної стійкості, особливо у вологій атмосфері, оскільки без цього