

УДК 668.045.18

Василь Ковбашин¹, канд. хім. наук, доц.; Ігор Бочар² канд. техн.наук, доцент

¹Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

²Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОБРОБКИ МОЛІБДЕНУ ТА ВОЛЬФРАМУ

Анотація. Розглянуто шляхи підвищення пластичності молібдену та вольфраму та їх сплавів із можливістю суттєвого зниження відсотку браку при виготовленні виробів із листового прокату та дроту. Досягнення поставленої мети передбачає використання технології тристадійного процесу хіміко-термічної обробки, який включає високотемпературний відпал, вакуумне рафінування, дифузійне насичення поверхні однойменним металом.

Ключові слова. Молібден, вольфрам, хіміко-термічна обробка, високотемпературний відпал, дифузійне насичення поверхні однойменним металом.

Vasiliy Kovbashyn¹, Igor Bochar²

TECHNOLOGICAL FEATURES OF MOLYBDENUM AND TUNGSTEN PROCESSING

Abstract. The ways of increasing the plasticity of molybdenum and tungsten and their alloys with the possibility of significantly reducing the percentage of defects in the manufacture of rolled sheet and wire products are considered. Achieving the set goal involves the use of a three-stage process of chemical-thermal treatment technology, which includes high-temperature annealing, vacuum refining, diffusion saturation of the surface with the same metal.

Keywords. Molybdenum, tungsten, chemical-thermal treatment, high-temperature annealing, diffusion saturation of the surface with the same metal.

Молібден і вольфрам належать до групи тугоплавких металів, які характеризуються високою температурою плавлення, значною міцністю та термічною стабільністю. Завдяки цьому вони широко застосовуються у виробництві виробів електронної, світлотехнічної та радіотехнічної промисловості, де використовують листовий прокат, дріт, фольгу та прутки зі сплавів молібдену і вольфраму (зокрема марок МЧ, ЦМ-2А, МЛТ, ВА, ВТ-7, ВТ-10, ВТ-15). Формування виробів із зазначених матеріалів здійснюється переважно методами холодного штампування або механічної обробки. Однак технологічність молібдену та вольфраму суттєво обмежується їх схильністю до крихкого руйнування, що пов'язано з наявністю домішок проникнення (кисень, азот, вуглець, водень), які концентруються переважно на межах зерен і спричиняють зниження пластичності. У промислових умовах це може призводити до високого рівня браку, який в окремих випадках перевищує 60 %.

Крім того, під час виробництва прокату і дроту з молібдену та вольфраму можливе утворення поверхневих макродефектів (тріщини, пори, раковини, подряпини), які додатково знижують пластичність та погіршують формоутворювальні властивості матеріалу. Знизити негативний вплив таких дефектів можливо шляхом механічної або хімічної обробки.

Для підвищення пластичності тугоплавких металів традиційно застосовують технології, що зменшують кількість таких дефектів. Зокрема, це проміжний високотемпературний відпал у вакуумі або в інертних газових середовищах (аргон, гелій), інколи у водні.

Недоліками зазначених методів є неповне видалення домішок проникнення, нестабільність отриманого ефекту, значні витрати інертних газів, вибухонебезпечність водню, а також складність та висока вартість обладнання, необхідного для глибокого очищення газових середовищ і створення високого вакууму.

Таким чином, актуальним є розроблення способу, який поєднує ефективне очищення матеріалу від домішок із модифікацією поверхневого шару, що забезпечує зниження рівня браку.

Метою роботи є підвищення пластичності молібдену та вольфраму (а також їхніх сплавів) і зниження відсотка браку при виготовленні виробів із листового прокату та дроту. Для досягнення поставленої мети запропоновано тристадійний процес хіміко-термічної обробки, що включає високотемпературний відпал, вакуумне рафінування [1,2] та дифузійне насичення поверхні однойменним металом (молібденування) [3], (вольфрамування) [4]. Дослідження проводили на зразках із прокату молібдену та вольфраму розміром $50 \times 10 \times 0,5$ мм.

Високотемпературний відпал здійснювали при температурному режимі $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ у вакуумному інертному середовищі з витримкою одна година. Метою етапу є активація дифузійних процесів і переміщення домішок проникнення з об'єму металу до приповерхневої зони.

Вакуумне рафінування проводили у вакуумній печі під тиском 10^{-5} Па в контейнері з порошковою сумішшю складу (мас. %): Ti – 40, Mg – 20, Cr – 25, церій-лантанова лігатура – 10, розріджувач (Al_2O_3) – решта.

Температура процесу не перевищувала $0,4 T_{\text{пл}}$ оброблюваного металу. Обробка здійснювалася циклічно (до чотирьох циклів) із тривалістю кожного циклу 4 години. На цьому етапі відбувається хімічне зв'язування домішок проникнення у приповерхневій зоні.

Дифузійне насичення поверхні виконували в порошковій суміші складу (мас. %): Mo (або W) – 50–65, AlF_3 – 1,5–3, Al_2O_3 – решта. Порошки Mo або W мали фракцію до 120 мкм, AlF_3 та Al_2O_3 — до 40 мкм. Суміш готували шляхом ретельного перемішування.

Зразки встановлювали у жароміцні контейнери з дотриманням регламентованих відстаней між зразками та стінками контейнера. Процес проводили у вакуумній печі під тиском 10^{-5} Па. Для молібдену – при $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для вольфраму – при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом однієї години.

Після завершення обробки контейнери охолоджували разом із піччю до кімнатної температури. Активність суміші зберігалася протягом 15–20 циклів із періодичним додаванням 2,5 % порошку Mo (W) та 1,5 % AlF_3 .

Механізм дії. Підвищення пластичності обумовлене дифузійним переміщенням домішок проникнення під час відпалу, їх зв'язуванням у процесі вакуумного рафінування, формуванням модифікованого поверхневого шару під час дифузійного насичення, зменшенням концентрації домішок на межах зерен та частковим усуненням поверхневих макродефектів.

У присутності AlF_3 утворюються леткі фторидні сполуки молібдену або вольфраму, що забезпечує масоперенесення насичувального елемента до поверхні виробу. Металографічні дослідження показали відсутність виражених макродефектів у поверхневому шарі після обробки. Результати експериментальних досліджень. Пластичність оцінювали методом багаторазового перегину (згин на 90° з поверненням у вихідне положення). Отримані результати:

Молібден (МЧ): до 20 циклів перегину; зниження браку з 20 % до 11 %.

Вольфрам (ВА): до 9 циклів перегину; зниження браку з 30 % до 15 %.

Активність порошкової суміші зберігають упродовж 15–20 повторних циклів, додаючи щоразу 2,5 % свіжого порошку (Mo або W) і 1,5 % AlF_3 . Залежно від вибраних пропорцій виділяють такі склади [5]:

- а) 50 % Mo (W), 3 % AlF_3 , решта – Al_2O_3 ,
- б) 55 % Mo (W), 2 % AlF_3 , решта – Al_2O_3 ,
- в) 65 % Mo (W), 1,5 % AlF_3 , решта – Al_2O_3 ,
- г) Порівняльний приклад – (Ti – 40, Mg – 20, Cr – 25, церій-лантанової лігатури – 10, Al_2O_3 – решта).

Дослідні серії включали п'ять пластин для кожного зі способів. Результати подано в таблиці 1.

Таблиця 1. Результати досліджень

Метал	Кількість перегинів, шт./брак%			
	склад «а»	склад «б»	склад «в»	прототип «г»
Молібден	16/15	18/13	20/11	14/20
Вольфрам	7/19	8/17	9/15	4/30

Згідно з наведеними даними, запропонований спосіб підвищує пластичність молібдену та вольфраму приблизно в два рази порівняно з відомим підходом і дає змогу скоротити відсоток браку майже вдвічі. Додатковою перевагою є можливість багаторазового використання суміші для молібденування (вольфрамування).

Загалом запропонована технологія може бути впроваджена для обробки фольги, дроту, листового прокату й прутків, що йдуть на виготовлення конструкційних компонентів електронних, світлотехнічних, радіотехнічних та спеціальних пристроїв.

Таким чином, порівняно з прототипом спостерігається приблизно дворазове підвищення пластичності та суттєве зниження частки бракованих виробів.

Висновки.

Розроблено тристадійний процес хіміко-термічної обробки молібдену та вольфраму, що поєднує відпал, вакуумне рафінування та дифузійне насичення поверхні однойменним металом. Запропонований спосіб забезпечує підвищення пластичності оброблених матеріалів приблизно вдвічі. Досягнуто істотного зниження рівня виробничого браку. Технологія придатна для обробки фольги, дроту, листового прокату та тонкостінних виробів, що застосовуються в електронній, світлотехнічній та радіотехнічній галузях.

Перелік посилань

1. Increase of energy efficiency of heat generator through batching components of burning Fedoreiko, V.S., Lutsyk, I.B., Iskerskyi, I.S., Zagorodnii, R.I. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2014, (4), pp. 27–32.
2. Buketov A., Stukhlyak P., Maruschak P., Panin S., Menou A. Regularities of impact failure of epoxy composites with Al_2O_3 microfiller and their analysis on the basis of external surface layer concept. Key Engineering Materials, 2016, 712, 2016, pp. 149-154.
3. Спосіб хіміко-термічної обробки листового вольфраму: пат 161844 Україна: C22F1/18. № у 2025 03288; заявл. 07.07.2025; опубл. 07.01.2026, Бюл. № 1. 4с.
4. Спосіб хіміко-термічної обробки виробів на основі молібдену: пат 161948 Україна: C22F1/18. № у 2025 03284; заявл. 07.07.2025; опубл. 21.01.2026, Бюл. № 3. 4с.
5. Kovbashyn V., Bochar I. Investigation of the change in technological properties of refractory metals after diffusion saturation. Scientific Journal of the Ternopol National Technical University ISSN 2522-4433. Web: visnyk.tntu.edu.ua. Вісник Тернопільського національного технічного університету. Тернопіль: В-во ТНТУ. №1 (109), 2023. С. 121–129. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.01 ISSN 2522-4433 .