

**Ліхацький Р. Ф.**  
**(ФТІМС НАН України, м. Київ)**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ХРОМ-ЦИРКОНІЄВОЇ БРОНЗИ**  
**ЛЕГОВАНОЇ ВАНАДІЄМ ТА ГАФНІЄМ**  
E-mail: richardlihatkyi@gmail.com

Хром-цирконієві бронзи широко використовуються в електротехніці як сплави, що поєднують високі механічні та електропровідні властивості. Більшість легувальних добавок сильно знижують провідні властивості мідних сплавів, тому їх підбір з метою покращення міцнісних характеристик повинен враховувати цей вплив (рис. 1) [1].

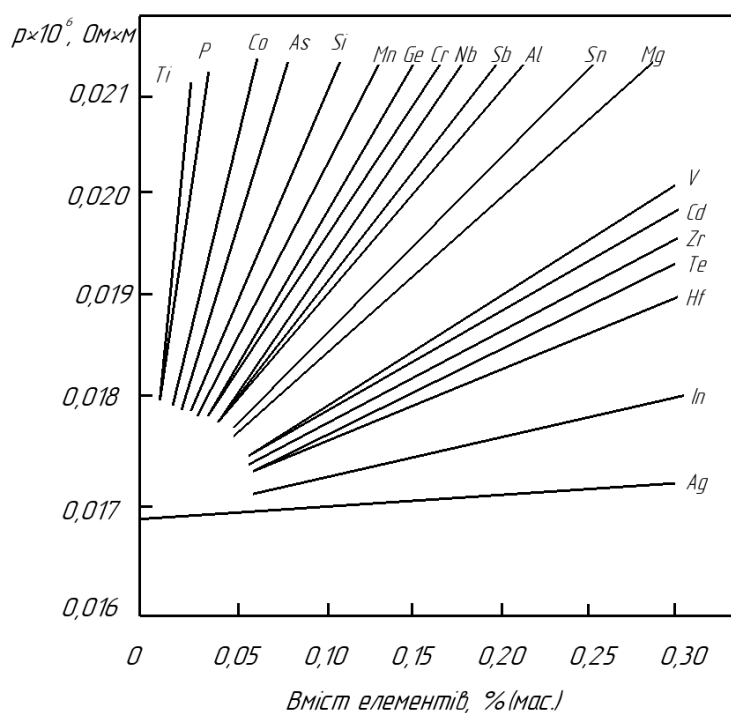


Рис. 1. Вплив домішок і легувальних елементів на електричний опір міді

Хром та цирконій здатні забезпечувати дисперсійне зміцнення міді, але, як можна помітити з рис. 1, додавання хрому різко знижуватиме провідність отриманого сплаву. Тому оптимальним варіантом є додавання хрому в комплексі з цирконієм у мінімальних кількостях [2]. Це також призводитиме до зменшення розмірів скупчень хрому та покращенню його розподілу в розплаві в цілому.

Окрім меншого впливу на електропровідність менший розмір частинок хрому зумовить покращення міцності на розтяг отриманого сплаву [3, 4].

Гафній має схожі з цирконієм властивості щодо впливу на мікроструктуру і властивості міді. Головною відмінністю між ними є більша розчинність в міді гафнію (до 0,4% ат.) у порівнянні з цирконієм (0,12% ат.) [5]. Теоретично це дозволить досягнути кращого зміцнення сплавів без значного зниження провідності. Однак, отримання такого сплаву поступатиметься в плані економічної доцільності своїм аналогам, легованих цирконієм.

Легування ванадієм подібних сплавів практично не досліджувалось, проте в роботах [6, 7] показано можливість ефективного введення ванадію в мідь в умовах електронно-променевої ливарної технології. Одержані виливки характеризувалися досить рівномірним розподілом сферичних дрібнодисперсних (до 0,5-1,0 мкм) вкраплень ванадію.

Враховуючи велику різницю температур плавлення хрому, ванадію, гафнію та міді, такі сплави доцільно виплавляти з використанням концентрованих джерел нагріву. Тому плавлення проводили в електронно-променевої установці у вакуумі. Для одержання гомогенного розплаву застосовували електромагнітне переміщення рідкометалевої ванни. На рис. 2 зображено вилівок отриманого сплаву хром-цирконієвої бронзи, легований гафнієм та ванадієм. Вміст всіх легувальних елементів знаходився на рівні 0,1% мас.



Рис. 2. Отриманий зразок сплаву Cu-Cr-Zr-V-Hf

Мікроструктура та розподіл елементів сплаву (рис. 3) показує рівномірну структуру та засвоєння всіх компонентів. Хром проявляє рівномірний розподіл та відсутність сигрегацій. Цирконій виступає у вигляді дрібних скупчень по межах зерен. Ванадій та гафній рівномірно розподілились по об'єму сплаву у вигляді дрібнозернистих вкраплень.

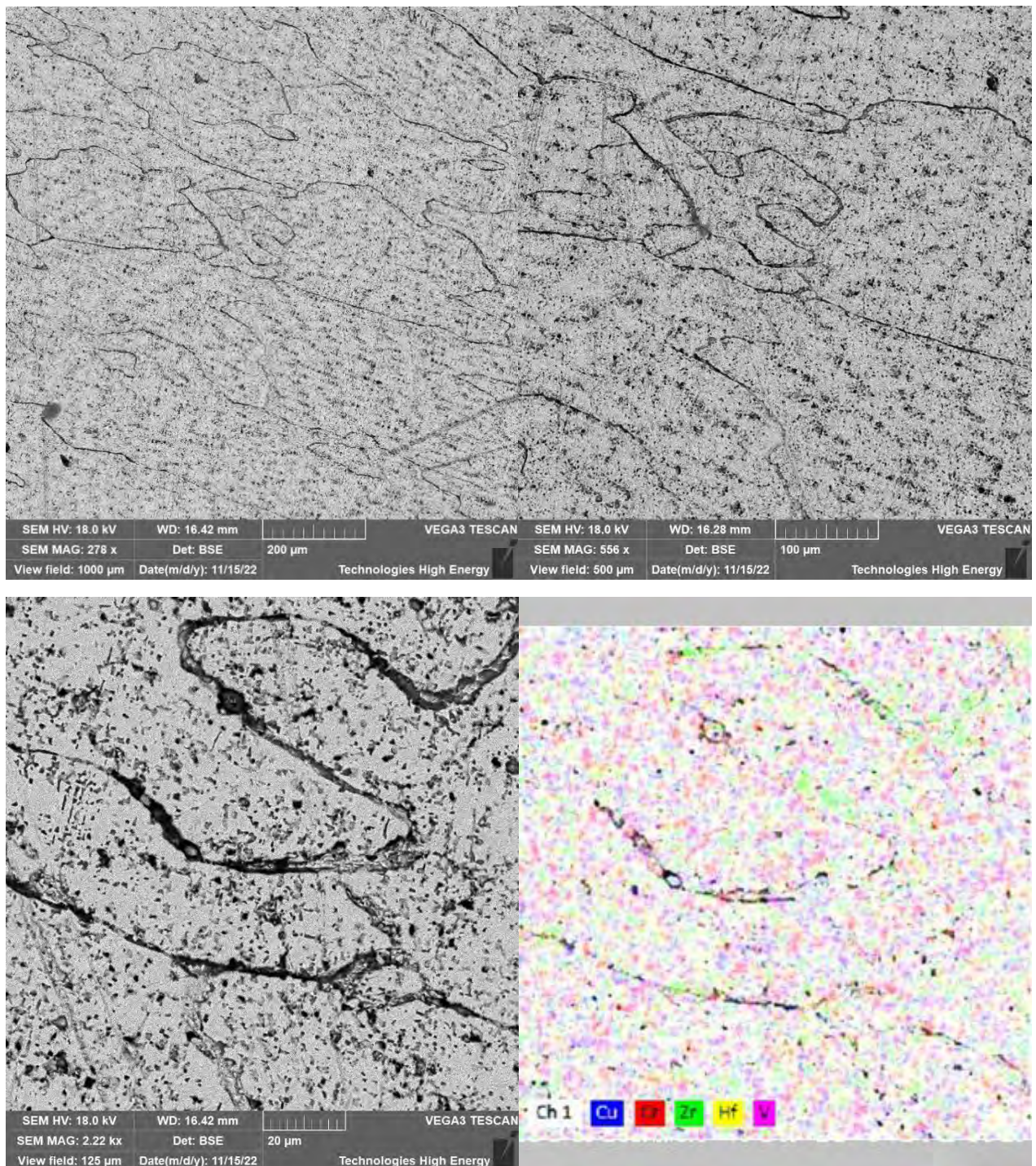


Рис. 3. Мікроструктура та розподіл елементів сплаву Cu-Cr-Zr-V-Hf

Додавання гафнію в сплави систем Cu-Cr може більше покращувати механічні властивості при збереженні електропровідності в порівнянні з цирконієм. На межах зерен його вміст перевищує в 2-3 рази вміст цирконію, що має позитивно впливати на гальмування рекристалізації та підвищенні, таким чином, жароміцності. Ванадій підвищує дрібнодисперсність хром-вмісних включень і при цьому сам знаходиться в вигляді дрібних частинок розмірами до 0,5 мкм і мінімально знижує електропровідність. Таким чином вдається реалізувати одночасне зерноподрібнення та зміцнення за рахунок знаходження дисперсних нерозчинних частинок в середині зерен і на їх границях.

#### Література:

1. Pohja, R., Vestman, H., Jauhiainen, P., & Hänninen, H. (2003). Narrow Gap Arc Welding Experiments of Thick Copper Sections. Olkiluoto, Finland. ISBN: 951-652-123-1.
2. Shaojian, Zh., Rengeng, L., Huijun, K., Zongning, Ch., Wei, W., Cunlei, Z., Tingju, L., & Tongmin, W. (2017). A high strength and high electrical conductivity Cu-Cr-Zr alloy fabricated by cryorolling and intermediate aging treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 680(1), 108-114.
3. Hang, W., Liukui, G., Jinfa, L., Huiming, Ch., Weibin, X., & Bin, Y. (2018). Retaining meta-stable fcc-Cr phase by restraining nucleation of equilibrium bcc-Cr phase in CuCrZrTi alloys during ageing. *Journal of Alloys and Compounds Volume*, 749(1), 140-145.
4. Yin, Y., Gui, K., & Rengeng, L. (2022). Optimizing the Electrical and Mechanical Properties of Cu-Cr Alloys by Hf Microalloying. *Metals*, 12(3).
5. Okamoto, H., Schlesinger, M. E., & Mueller, E. M. (2016). Alloy Phase Diagrams, ASM handbook (Vol. 3). ASM International.
6. Ліхацький, Р. Ф. (2020). Спеціальні сплави та композити на основі міді та методи їх одержання. *Процеси лиття*, 1(139), 61-68.
7. Ліхацький, Р. Ф., & Ворон, М. М. (2021). Механічні властивості сплавів системи Cu-V отриманих в умовах електронно-променевої ливарної технології. XVII Міжнародна НПК Литво. Металургія. Запоріжжя, 111-113.