

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут матеріалознавства
та зварювання ім. Є.О. Патона**

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

«___» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг та комп'ютерне
моделювання в матеріалознавстві»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

**на тему: «Структурно-фазові характеристики сплавів міді з цирконієм, хромом
і ванадієм»**

Виконала:

здобувачка IV курсу, групи ФМ-21

Сиротюк Анна Володимирівна

Керівник:

д.т.н., ст. дослідник Ворон Михайло Михайлович

Консультант з розділу охорони праці:

зав. каф., д.т.н., професор Левченко О. Г.

Консультант з економічно-організаційного розділу

доцент, к.е.н., доцент Нараєвський С. В.

Консультант з питань нормконтролю:

ст.в. Шаповалова Н.А.

Рецензент:

професор каф. ВМ та ПМ, д.т.н. Мініцький А.В.

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Здобувачка _____

Київ – 2026 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут матеріалознавства
та зварювання ім. Є.О. Патона**

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студентці

Сиротюк Анни Володимирівни

1. Тема роботи «Структурно-фазові характеристики сплавів міді з цирконієм, хромом і ванадієм», керівник роботи Ворон Михайло Михайлович, доцент, к.т.н., ст. дослідник, затверджені наказом по університету

від «28» травня 2026 р. №1986-с

2. Термін подання студенткою роботи

3. Вихідні дані до роботи: подвійні фазові діаграми стану систем Cu-Zr, Cu-Cr, Cu-V; мікроструктури сплавів систем Cu-Zr, Cu-Cr, Cu-V та Cu-Cr-Zr-V індукційної виплавки.

4. Зміст роботи: літературний огляд; матеріали та методика досліджень; результати та їх обговорення; економічна частина; охорона праці.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 86 сторінки, 13 таблиць, 32 рисунки, 1 презентація.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно економічна частина	Нараєвський С.В. доцент		
Охорона праці	Левченко О.Г. зав. каф., професор		
Нормоконтроль	Шаповалова Н.А. ст.в.		

7. Дата видачі завдання 20.04.2026

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Видача завдання	20.04.2026	виконала
	Огляд літератури	21.04.2026	виконала
	Освоєння методик дослідження	22.04.2026	виконала
	Виконання експериментальних досліджень	23.04.2026	виконала
	Отримання результатів, їх аналіз	07.05.2026	виконала
	Оформлення дипломної роботи	02.06.2026	виконала
	Попередній захист	04.06.2026	виконала
	Захист на засідання ЕК	15.06.2026	

Здобувачка ВО

Анна СИРОТЮК

Керівник

Михайло ВОРОН

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 86 сторінки, 13 таблиць, 32 рисунки, 45 літературних джерел.

ВАНАДІЙ, ЛЕГУВАННЯ, МІДЬ, СПЛАВ, СТРУКТУРА, ТЕХНОЛОГІЯ, ХРОМ, ЦИРКОНІЙ

Об'єкт дослідження: технологічні особливості засвоєння в розплаві міді малорозчинних компонентів – цирконію, хрому та ванадію та їхній вплив на формування структурно-фазових характеристик сплавів систем Cu-Cr, Cu-V, Cu-Zr та Cu-Cr-V-Zr індукційної виплавки в литому стані.

Предмет дослідження: структурно-фазові характеристики мідних сплавів систем Cu-Cr, Cu-V, Cu-Zr та Cu-Cr-V-Zr електротехнічного призначення, одержаних методом індукційної плавки.

Мета роботи: Дослідження структурно-фазових характеристик сплавів системи Cu-Cr, Cu-V, Cu-Zr та Cu-Cr-V-Zr електротехнічного призначення.

Методи дослідження: рентгенофлуорисцентний та спектроскопічний аналізи хімічного складу, оптична металографія, скануюча електронна мікроскопія та мікродюрOMETричний аналіз.

Результати дослідження та їх новизна: було вперше досліджено можливості виплавки сплавів Cu-Cr, Cu-V, Cu-Zr та Cu-Cr-V-Zr індукційним способом. Встановлено особливості засвоєння компонентів та структурних особливостей сплавів. Показано, що додавання цирконію не розширює межі розчинності хрому та ванадію в розплаві міді, а їх одночасне додавання суттєво подібнює структуру сплавів.

Сфера застосування: сплави досліджуваних систем мають електротехнічне призначення, зокрема є орієнтованими на роботу в умовах високого струму та підвищених температур.

ABSTRACT

The diploma work consists of: 86 pages, 13 tables, 32 figures, 45 references.

VANADIUM, ALLOYING, COPPER, ALLOY, STRUCTURE,
TECHNOLOGY, CHROMIUM, ZIRCONIUM

Research object: Technological features of the incorporation of poorly soluble components – zirconium, chromium, and vanadium – into molten copper and their influence on the formation of the structural and phase characteristics of Cu-Cr, Cu-V, Cu-Zr and Cu-Cr-V-Zr systems produced by induction melting in the as-cast state.

Subject of research: structural and phase characteristics of copper alloys and alloys of the Cu-Cr, Cu-V, Cu-Zr and Cu-Cr-V-Zr systems for electrical purposes, obtained by induction melting.

The purpose of the work: research into the technological features of induction melting of copper alloys of the Cu-Cr, Cu-V, Cu-Zr and Cu-Cr-V-Zr systems for alloys for electrical purposes and determination of their structural and phase characteristics.

Research methods: X-ray fluorescence and spectroscopic analyses of chemical composition, optical metallography, scanning electron microscopy and micro-hardness analysis.

Results and novelty: the possibility of smelting Cu-Cr, Cu-V, Cu-Zr and Cu-Cr-V-Zr alloys by the induction method was investigated for the first time. The peculiarities of component incorporation and the structural features of the alloys were established. It was shown that the addition of zirconium does not broaden the solubility limits of chromium and vanadium in the copper melt, while their simultaneous addition significantly refines the alloy structure.

Fields of application: the alloys of the studied systems are intended for electrical engineering applications, specifically for operation under high-current and elevated-temperature conditions.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	12
1.1 Вимоги до сучасних електротехнічних сплавів на основі міді	12
1.2 Фізико-хімічні характеристики міді	12
1.3 Галузі застосування міді	14
1.4 Особливості легування міді хромом, цирконієм та ванадієм	15
1.5 Технологічні переваги індукційної виплавки	22
1.6 Термічна обробка мідних сплавів	23
1.7 Висновки до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	25
2.1 Шихтові матеріали	25
2.2 Принцип роботи індукційної плавильної печі	26
2.3 Приготування розплавів	28
2.4 Термічна обробка для зразків системи Cu-Cr-V-Zr	32
2.5 Методи дослідження структури та властивостей досліджуваних зразків..	33
2.6 Висновки до розділу 2	35
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	36
3.1 Аналіз отриманих даних	36
3.2 Рентгенофлуорисцентний та спектральний аналізи хімічного складу досліджуваних мідних сплавів	36
3.3 Оптична металографія досліджуваних мідних сплавів	38
3.4 МікродюрOMETричний аналіз досліджуваних мідних сплавів	41

3.5 Дослідження впливу термічної обробки на структурно-фазові характеристики сплаву Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V	42
3.6 Висновки до розділу 3	51
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	54
4.1 Науково-технічна актуальність	54
4.2 Розрахунок витрат на проведення дослідження	54
4.2.1 Витрати на оплату праці	55
4.2.2 Єдиний соціальний внесок	56
4.2.3 Витрати на матеріали, для проведення дослідження	57
4.2.4 Витрати на енергоносії для проведення дослідження	58
4.2.5 Витрати на спеціальне обладнання	58
4.2.6 Витрати на послуги сторонніх осіб	58
4.2.7 Витрати на службові відрядження	58
4.2.8 Інші прямі невраховані витрати	59
4.2.9 Накладні витрати	59
4.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми	59
4.3 Науково-технічна ефективність НДР	60
4.4 Висновки до розділу 4	64
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ	65
5.1 Правові основи охорони праці	65
5.2 Аналіз параметрів приміщення	66
5.3 Аналіз мікроклімату в робочій зоні приміщення	67
5.4 Аналіз освітленості приміщення	68
5.5 небезпечні чинники при роботі із індукційною установкою	68

	8
5.6 Аналіз впливу шуму та вібрації	70
5.7 Електробезпека	71
5.8 Засоби індивідуального захисту	72
5.9 Пожежна безпека	73
5.10 Висновки до розділу 5	74
ВИСНОВКИ	75
CONCLUSIONS	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	81

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГЦК – кубічна гранецентрована ґратка

мас.% – масові відсотки

НДР – науково-дослідна робота

ОЦК – об'ємцентрована кубічна ґратка

ТО – термічна обробка

ISCG – international copper study group

ВСТУП

Одним із найважливіших металів, що застосовує людство є мідь. Завдяки поєднанню таких властивостей, як електропровідність, теплопровідність та корозійна стійкість, мідь є незамінним матеріалом практично у всіх галузях сучасної індустрії, популярність якої зростає з кожним роком, з розвитком сучасних технологій. Проте, чиста мідь має досить низьку жароміцність та зносостійкість при високих температурах, що дуже обмежує її використання. Для того, щоб використання міді розширювалось, використовують процес легування, зокрема ванадієм, хромом та цирконієм – елементи, які сприяють утворенню дисперсних зміцнюючих фаз.

Системи Cu-Cr та Cu-V демонструють діаграми стану монотектичного типу. До того ж хром та ванадій мають дуже низьку розчинність в міді в твердому стані. Це дає змогу використовувати зазначені легуючі добавки для створення мідних сплавів з композитною структурою, в яких мідна матриця буде зміцнена дисперсними частинками хрому або ванадію, але електропровідність такого сплаву повинна бути на рівні значень для чистої міді.

В той же час, одержання сплавів таких систем є складним з технологічної точки зору і часто вимагає застосування методів порошкової металургії. При цьому, відповідно до діаграм стану, хром в розплаві міді можливо розчинити у кількості до 2 мас.%, а ванадій – до 0,4 мас.% за температур, допустимих для виплавки міді та її сплавів. Цирконій потенційно здатен збільшити розчинність хрому та ванадію в міді, а також здатен формувати за їх участі та з міддю зміцнюючі інтерметаліди.

Технологія індукційної виплавки мідних сплавів дозволяє виготовляти такі матеріали доволі простим способом, зберігаючи високу якість. Не зважаючи на те, що технології більше ніж сто років, вона є поширеною у сучасній металургії та ливарному виробництві. Зокрема, вона забезпечує високу чистоту розплаву від домішок, оскільки у процесі не беруть участь паливо та дуговий розряд. Варто відзначити, що під час процесу виникають вихрові

струми, що сприяють перемішуванню розплаву та забезпечують його гомогенність.

Таким чином, ідея роботи полягає у визначенні технологічних можливостей виплавки сплавів на основі міді, легованих цирконієм, хромом та ванадієм як для одержання лігатур, так і для сплавів, а також у дослідженні їх структурно-фазових характеристик, тому що сучасний світ та його обладнання вимагає матеріалів, які здатні працювати за високих температур та навантажень без втрати ключових властивостей.

РОЗДІЛ 1

ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Вимоги до сучасних електротехнічних сплавів на основі міді

Виробництво та застосування міді та мідних сплавів мають велику затребуваність у сучасному світі, оскільки є надважливими матеріалами в галузі електротехніки [1].

Велику увагу приділяють електротехнічним мідним сплавам, які в подальшому повинні працювати в екстримальних умовах – зазнавати тертя, впливу високих температур, навантажень, тощо. Матеріали з такими властивостями використовують галузі, такі як: енергетика, електротранспорт та авіакосмічна промисловість, для виготовлення деталей електричних машин, парових турбін та інших виробів, які працюють за високих температур [1].

Оскільки процес виготовлення деталей із жароміцних електротехнічних мідних сплавів є складним та багатостадійним процесом, виробники постійно працюють над тим як підвищити ефективність. Серед сучасних підходів можна виділити, зміну систем легування, використання ливарних технологій, а також використання вторинної сировини [1].

Виробники найчастіше як провідниковий матеріал використовують мідь марок М1 та М0, тому що це забезпечує мінімальні втрати електричної енергії та довговічність контактних з'єднань. Наприклад, відпалена мідь марки М1 служить стандартом маючи питомий електроопір $\rho = 0,0172 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ при температурах від 20 °С до 150 °С [2].

1.2 Фізико-хімічні характеристики міді

Для розуміння фізико-хімічних властивостей будь-якого елементу, зокрема міді, варто знати, що у матеріалознавстві виділяється три ієрархічні рівні будови речовини, а саме: атом, молекула та фаза [3].

На атомному рівні цей метал відзначається високою електропровідністю, що сягає $58 \cdot 10^6$ См/м, та значною теплопровідністю – 401 Вт/(м·К), оскільки для міді характерний металічний зв'язок з великою кількістю вільних електронів [4].

Молекулярний рівень для міді характеризується кристалічною ґраткою кубічного гранецентрованого типу (ГЦК) з періодом 3,61 Å (рис. 1.1), що забезпечує високу пластичність [4].

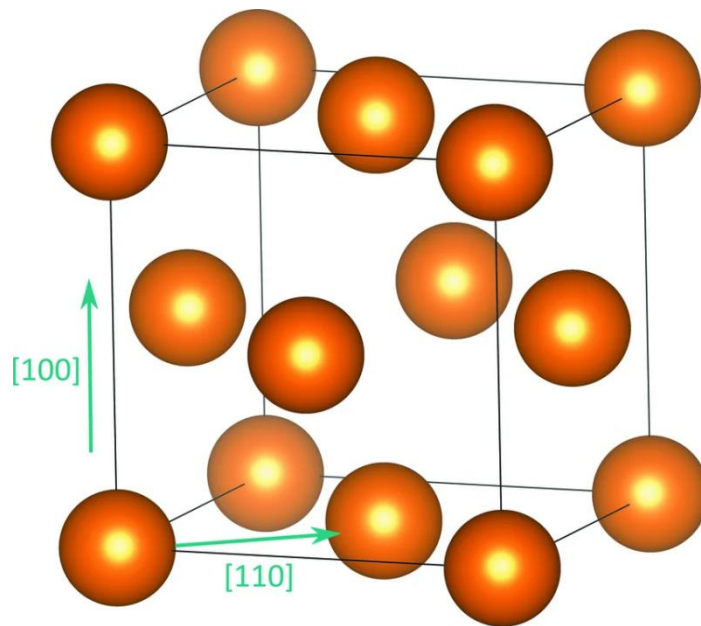


Рисунок 1.1 – Кристалічна ґратка кубічного гранецентрованого типу [5]

Фазовий рівень вказує, що температура плавлення міді становить 1084 °С, а її густина – 8,96 г/см³ [4].

Саме ці характеристики роблять мідь незамінним металом у галузях, де головним фактором є тепло- та електрообмін.

Незважаючи на ці переваги, чиста мідь має обмежену стійкість до високих температур та недостатню зносостійкість при інтенсивних термічних та механічних навантаженнях. Ці обмеження і створюють потребу в розробці легованих мідних сплавів з покращеними характеристиками.

1.3 Галузі застосування міді

Використання міді можливе у вигляді чистого металу або сплавів (з хромом, берилієм, сріблом, цирконієм, тощо). Згідно даним ISCG (International Copper Study Group) метал відіграє значну роль в різних галузях (рис. 1.1) [1].

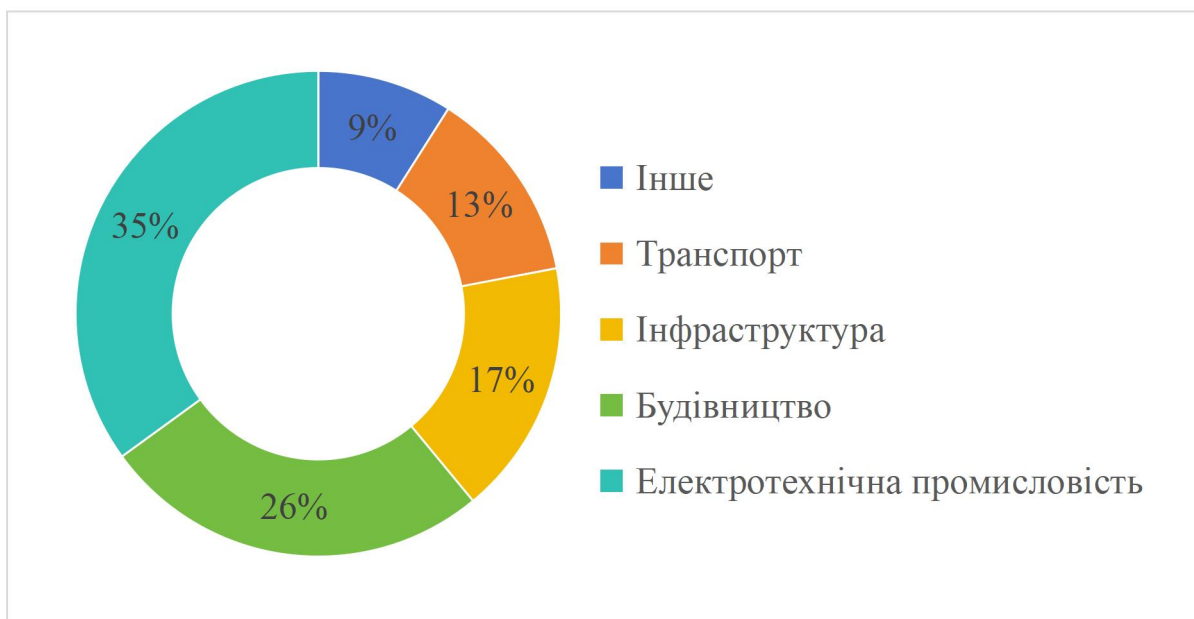


Рисунок 1.1 – Глобальне використання міді на 2025 рік [1]

Близько 35 % світового споживання міді становить електротехнічна промисловість (кабелі, трансформатори, електродвигуни) завдяки високій електропровідності. Значна частка (26 %) використовується у будівництві (опалення та водопостачання) через довговічність та корозійну стійкість. Інфраструктурний сектор (електромережі, залізничні колії та телекомунікаційні лінії) займає 17 % ринку. Приблизно 13 % спрямовується на транспортне машинобудування (електричні системи, радіатори, контактні мережі). Решта 9 % розподіляється між виробництвом монет та військової техніки [1].

Важливим аспектом використання міді є її здатність до безкінечної переробки без втрати фізико-хімічних властивостей. В умовах сталого розвитку це дозволяє раціонально використовувати обмежені ресурси, суттєво знижуючи енерговитрати та обсяги викидів. Вторинна переробка не замінює видобуток

руди, але слугує його потужним доповненням, що значно збільшує обсяги доступного металу на світовому ринку [1].

1.4 Особливості легування міді хромом, цирконієм та ванадієм

Легування здійснюється з метою покращення механічних, технологічних, антифрикційних та інших властивостей, шляхом додавання різних хімічних елементів.

Відомо, що компоненти сплаву розчиняючись у матриці міді, можуть зменшити її електропровідність. Саме тому, коли до матриці додають нерозчинний або слабозчинний елемент (хром, цирконій, ванадій) це спричиняє суттєві зміни в структурі та властивостях сплаву, зумовлені особливою взаємодією цих елементів [6]. Вона полягає в тому, що саме такі малорозчинні елементи легко можуть виділятися з твердого розчину як в чистому вигляді, так і у складі інтерметалідів та зміцнювати мідну матрицю з мінімальними втратами нею електропровідності.

Діаграма фазового стану системи Cu-Cr, зображена на рисунку 1.2, є оптимальною для створення жароміцних сплавів на основі міді [6]. Дана фазова діаграма стану характеризується евтектичним типом, з обмеженою розчинністю хрому в міді у твердому стані та зовсім нерозчинною у рідкому стані. Показано, що евтектичне перетворення відбувається при температурі 1070 °C. Помітно, що розчинність хрому у твердому розчинні досягає приблизно 0,8 мас.% при 1000 °C і знижується до 700 °C.

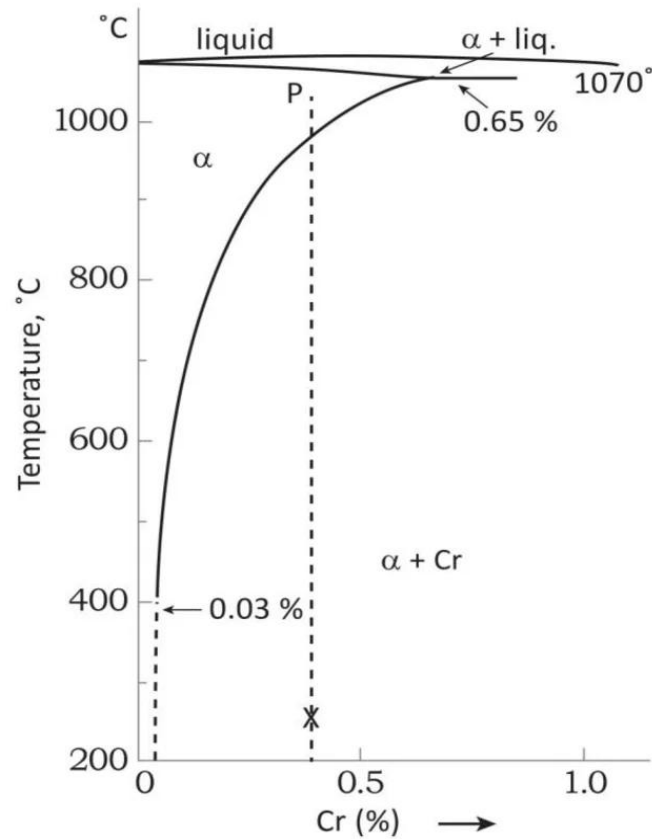


Рисунок 1.2 – Діаграма стану системи Cu-Cr [7]

Виділення хрому в сплаві системи Cu-Cr сприяє зміцненню міді, завдяки об'ємноцентрованій кубічній ґратці (ОЦК), яка створює механічний опір для дислокацій, що дозволяє зберігати високу електропровідність [6].

Наслідки легування міді цирконієм відрізняються від хрому, що помітно на фазовій діаграмі стану Cu-Zr (рис. 1.3). При додаванні цирконію в малих порціях, виділяється мідна фаза Cu_5Zr . Ці частинки працюють як стабільні дисперсоїди, які блокують рух дислокацій і не розчиняються при високих температурах, тим самим збільшуючи міцність міді [6]. Концентрація цирконію в евтектиці досягає 8 мас.%.

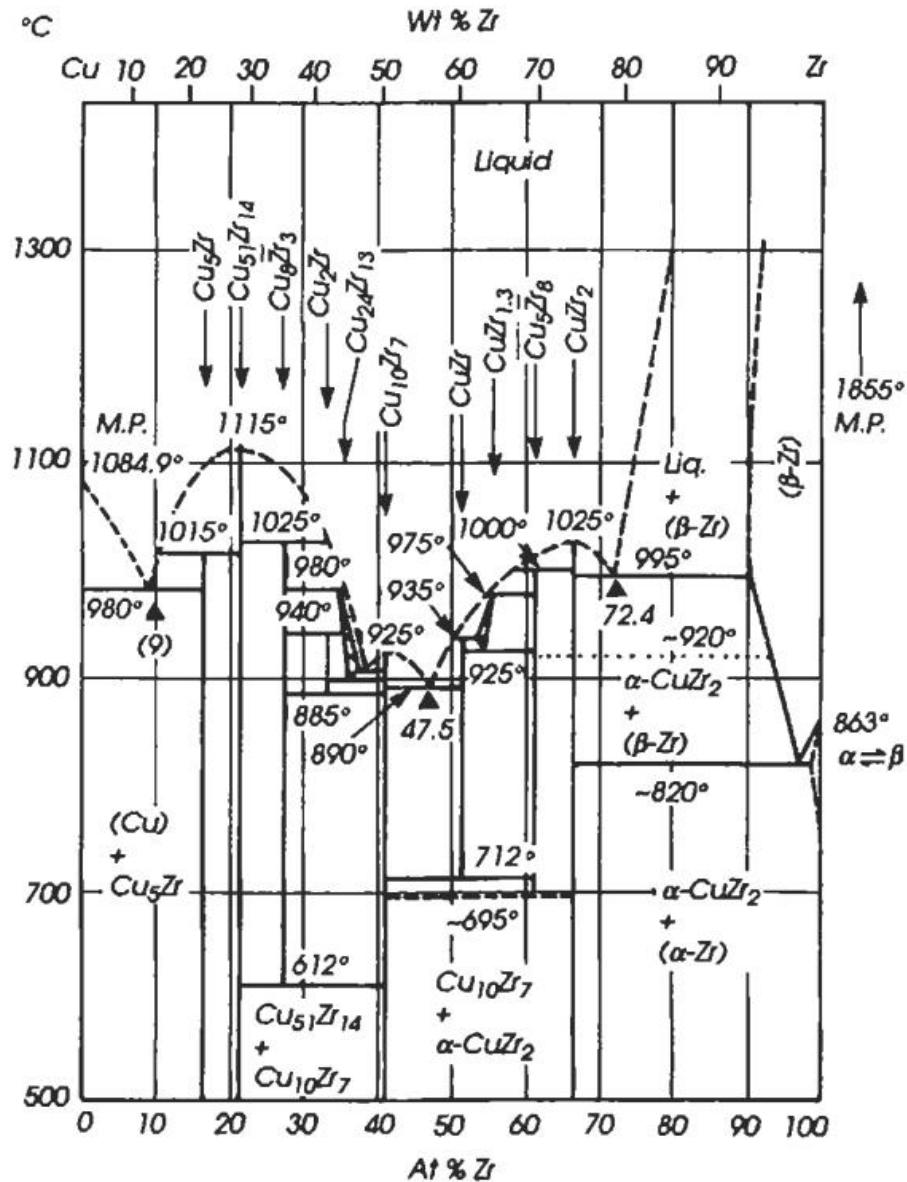


Рисунок 1.3 – Діаграма стану системи Cu-Zr [8]

При додаванні ванадію до мідної матриці, утворюються нерозчинні дрібнодисперсні включення, які розташовуються переважно всередині зерен, що забезпечує ефективне дисперсне зміцнення [6].

Діаграма стану Cu-V (рис.1.4), показує, що при вмісті ванадію приблизно 0,6 мас.% відбувається монотектичне перетворення. Оскільки в системі є область нерозчинності при збільшенні концентрації ванадію структура мідних сплавів стає неоднорідною.

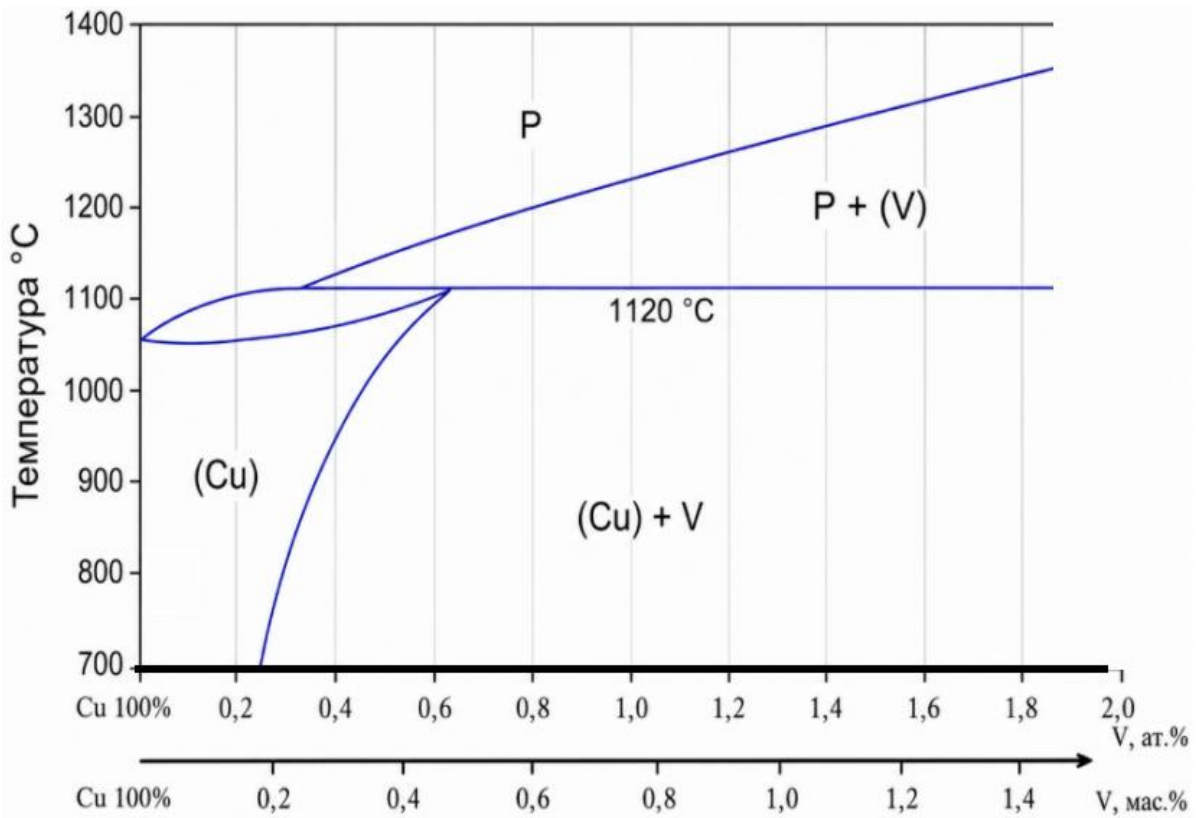


Рисунок 1.4 – Діаграма стану системи Cu-V [9]

Для того, щоб використовувати декілька легуючих елементів в одному мідному сплаві, важливо не просто знати як вони взаємодіють із мідною матрицею, не менш важливим є також їхня взаємодія одне з одним.

На рисунку 1.5 зображена фазова діаграма стану Cr-Zr, що є бінарною системою з двома евтектичними перетвореннями, та характерна наявністю хімічної сполуки постійного складу. Можна помітити, що даній системі притаманне утворення одного стійкого інтерметаліду, а саме – ZrCr_2 , який може грати роль зміцнюючої фази для сплавів, у яких він буде утворений. Даний інтерметалід в залежності від температурних умов зазнає поліморфні перетворення, які проявляються у вигляді трьох модифікацій [10], але його основна модифікація є стабільною до 1592 °C, чого цілком достатньо для необхідного рівня стабільності його властивостей в складі мідних сплавів.

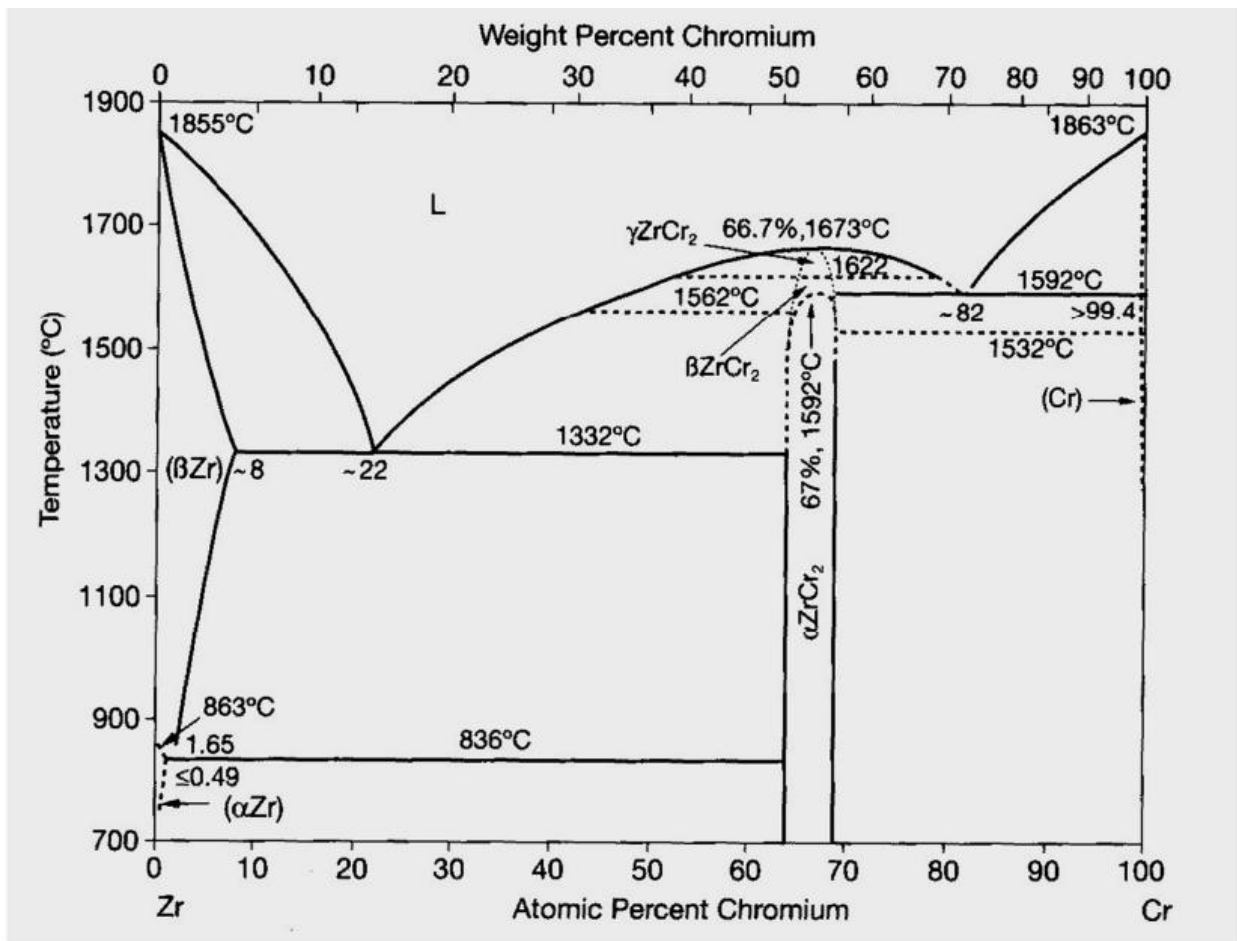


Рисунок 1.5 – Діаграма стану системи Cr-Zr [11]

Фазова діаграма стану Cr-V демонструє, що обидва елементи повністю розчинні одне в одному, як в рідкому, так і в твердому стані (рис. 1.6). Також помітно, що відсутні будь-які утворення інтерметалідів чи упорядкованих фаз при різних температурах та складі. Це можна пояснити тим, що двом елементам притаманна ОЦК ґратка, а також дуже схожі фізико-хімічні властивості [12]. Дані фактори, можуть свідчити про те, що якщо дані елементи використовувати як легуючі для мідної матриці, то можливе утворення зміцнюючих інтерметалідних частинок, які міститимуть одночасно хром та ванадій розчинені один в одному.

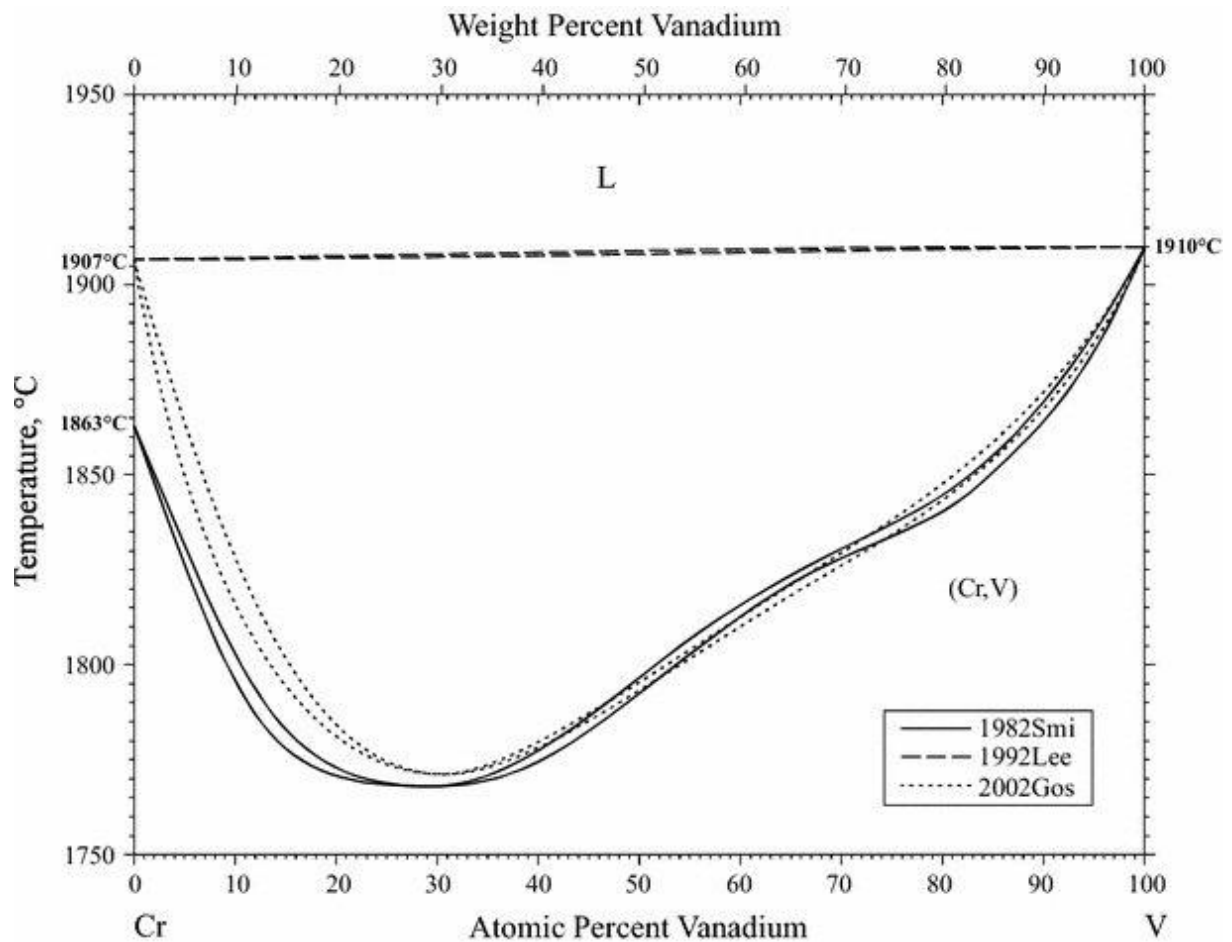


Рисунок 1.6 – Діаграма стану системи Cr-V [13]

Також варто звернути увагу на фазову діаграму стану системи Zr-V (рис. 1.7), яка дуже схожа із діаграмою стану Cr-Zr. Дана діаграма характеризується обмеженою розчинністю та евтектичним типом перетворень. Також помітно, що при температурі нижче 1300 °C утворюється інтерметалідна сполука V_2Zr , яка за різних температурних умов модифікується. Цей інтерметалід потенційно може бути корисним для створення мідних сплавів із високою жароміцністю [14].

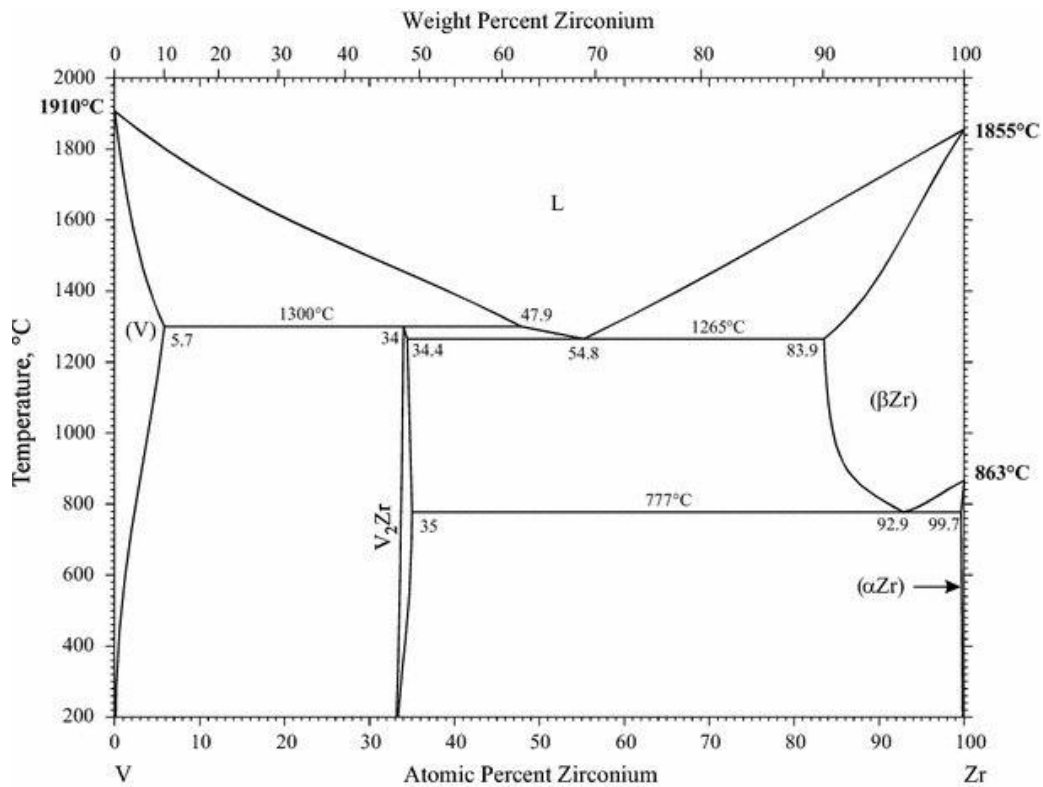


Рисунок 1.7 – Діаграма стану системи Zr-V [13]

Не варто забувати й про те, що при легуванні важливо забезпечити мінімальну допустиму концентрацію шкідливих домішок. На характеристики мідного сплаву суттєво впливає залізо та кисень.

Розчинність заліза в міді, яке відбувається в твердому стані є незначною. Під впливом заліза знижується електро- і теплопровідність міді, а також її корозійна стійкість. В той час, структура міді подрібнюється, що підвищує її міцність і зменшує пластичність [15].

Домішки кисню суттєво не впливають на електропровідність сплаву, однак призводять до зниження його механічних та технологічних властивостей. За нормальних умов кисень практично не розчиняється у міді, перебуваючи у вигляді окремих кулястих частинок CuO , що утворюють евтектику з міддю [16].

Структура литої міді являє собою ділянки суміші Cu_2O з Cu , що розташовані між кристалами Cu , що суттєво впливає на пластичність матеріалу та його оброблюваність, як в холодному так і в гарячому стані. Скупчення у сплаві Cu_2O , що утворюються при розриві оксидної плівки під час лиття, при деформаційній обробці мають ще більший вплив на його механічні та

технологічні властивості. Однак, при цьому кисень не впливає на можливість проведення термічної обробки, так як за температур до 900 °С не проникає глибоко в мідь [16].

1.5 Технологічні переваги індукційної виплавки

Технологія індукційної плавки базується на електромагнітній індукції, відкритій Майклом Фарадеєм у 1931 році. Індукційна виплавка відрізняється від традиційних методів (дугового, газового, тощо) принципом отримання тепла [17].

Головною особливістю цього методу є інтенсивна циркуляція рідкого металу в тиглі, саме тому нагрівання та плавлення металу в індукційних печах здійснюється завдяки струмам високої частоти, які наводяться безпосередньо в металошихті, що розплавляється електромагнітною індукцією за рахунок змінного магнітного поля, яке утворюється при проходженні струму через індуктор [18]. Орієнтовний характер циркуляційних потоків зображено на рисунку 1.8. Струми індукції, що виникають через вплив, який здійснює перемінне магнітне поле, отримали назву струми Фуко або вихрові струми [19].

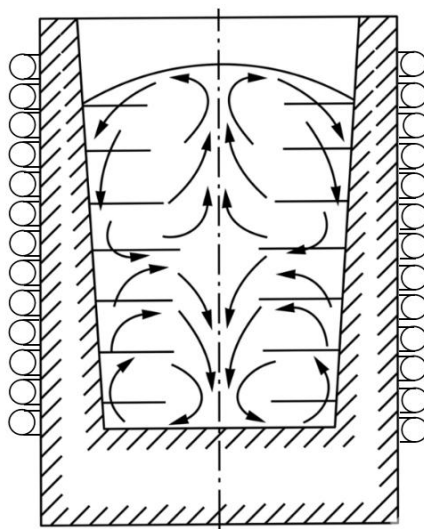


Рисунок 1.8 – Електродинамічна циркуляція металу в тиглі індукційної печі [19]

До переваг індукційної плавки відноситься наявність поверхневого ефекту – щільність струмів, які індукуються, на стінках тигля на поверхні металу досягає максимуму і знижується в напрямку до осі тигля [19].

Ще однією особливістю методу, яка відрізняє індукційну виплавку від інших традиційних методів є відсутність високотемпературних дуг. У результаті чого, водень та азот не поглинаються і вигорання металу та легуючих елементів під час плавлення неможливе [20].

1.6 Термічна обробка мідних сплавів

Термічна обробка (ТО) – це технологічний процес температурно-часової обробки сплавів з метою одержання нових, відмінних від існуючих, фізико-хімічних властивостей одного і того ж матеріалу. Даний процес застосовується як проміжна і як кінцева операція у виробництві металовиробів [21]. Проміжна ТО здійснюється з метою покращення технологічних властивостей металу, а кінцева ТО – для одержання оптимальної структури та фазового складу, які визначають кінцеві властивості матеріалу. Виходячи з цього, Андрій Бочвар розробив класифікацію видів термічної обробки, основними якими є: відпал, гартування та відпуск [21, 22].

Термічна обробка для мідних сплавів також впливає на їхні властивості, зокрема – електропровідність. При зміні температури та часу нагрівання атоми компонентів сплаву можуть змінювати своє розташування, утворюючи нові кристалічні фази. Ці структурні зміни можуть або поліпшити або погіршити електропровідність металу [23].

Під час відпалу дислокації та домішки, зникають або зменшуються, що покращує рух вільних електронів, відповідно і електропровідність. Гартування призводить до набуття більш високої міцності та твердості, проте створює додаткові перешкоди для руку електронів, що погіршує провідність. Щоб усунути даний недолік проводять старіння під час якого метал нагрівають до температури нижче загартування. Тим самим зменшується кількість дефектів

гратки та підвищується однорідність структури, відповідно – покращується електропровідність [21-23].

1.7 Висновки до розділу 1

1. У сучасному світі мідь та її сплави залишаються ключовими матеріалами для багатьох галузей завдяки унікальному поєднанню високої електропровідності та теплопровідності. Проте чиста мідь має суттєві обмеження: вона недостатньо стійка до зносу та втрачає свої властивості при високих температурах. Це зумовлює велику потребу в розробці складніших жароміцних сплавів, здатних працювати в екстремальних умовах.

2. Основним викликом при створенні таких матеріалів є збереження високої провідності при одночасному підвищенні міцності. Для цього використовують легування елементами, що мають мінімальну розчинність у мідній матриці, такими як хром, цирконій та ванадій.

3. Ефективність виробництва таких складних систем значною мірою залежить від обраної технології плавлення. Індукційна виплавка виявляється найбільш раціональним методом, оскільки використання струмів високої частоти забезпечує інтенсивну циркуляцію рідкого металу. Це гарантує гомогенність сплаву, а відсутність електричної дуги запобігає насиченню розплаву шкідливими газами та вигоранню цінних легуючих компонентів.

4. Використання термічної обробки, зокрема відпал, або гартування та старіння, покращують властивості мідних сплавів і безпосередньо – електропровідність.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Шихтові матеріали

В процесі проведення експериментальних досліджень в умовах індукційної виплавки були одержані лігатури, а саме: Cu-Cr, Cu-V, Cu-Zr та Cu-Cr-V-Zr. Шихтовими матеріалами були відходи міді марок МЗ, ванадію ВнМ-1, хрому ПХА та цирконію КТЦ марки Б (рис. 2.1). Їх хімічний склад та стандарти, яким вони відповідають зазначені в таблиці 2.1.



1 – мідь марки МЗ; 2 – хром ПХА; 3 – ванадій марки ВнМ-1;

4 – цирконій КТЦ марки Б

Рисунок 2.1 – Візуальний вигляд шихтових матеріалів

Таблиця 2.1 – Хімічний склад шихтових матеріалів

Компонент	Стандарт	Хімічний склад, мас. % (не більше)							
		основа	Fe	Mo	Zr	Si	Cr	C	інше
Мідь МЗ	ГОСТ 859-2001	Cu	0,05	-	-	0,01	-	-	0,5
Ванадій ВнМ-1	ТУ 48-4-272-73	V	0,15	-	-	0,2	0,01	-	0,2
Хром ПХА	ТУ 14-00186482-051-2005	Cr	0,5	-	-	0,2	99,0	0,03	0,5
Цирконій КТЦ марки Б	ТУ 25012091.001-94	Zr	0,07	0,005	-	0,04	0,005	0,02	0,04 Hf

Масовий вміст кожного компонента, що були використані для лігатур, наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Масовий вміст кожного компонента шихти

№	Лігатура	Масовий вміст кожного компонента шихти, г			
		Cu	Cr	Zr	V
1	Cu-Cr	946	48	-	-
2	Cu-V	925	-	-	45
3	Cu-Zr	944	-	57	-
4	Cu-Cr-V-Zr	920	30	31	20

2.2 Принцип роботи індукційної плавильної печі

Для виготовлення експериментальних зразків використовувалось наступне технологічне обладнання: лабораторна індукційна піч; лабораторна

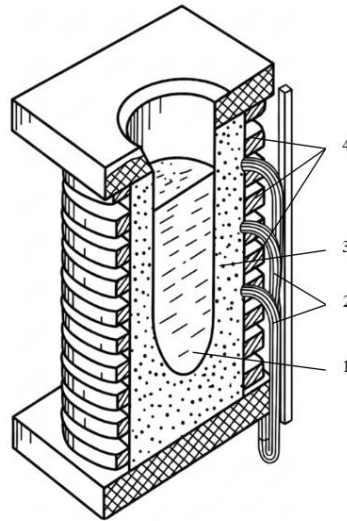
сушильна шафа, мідні кристалізатори для одержання заготовок клиновидної форми та графітовий тигель.

Для плавки використовувалась лабораторна індукційна піч потужністю 15 кВт та частотою 20 кГц, зовнішній вигляд якої показано на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд лабораторної індукційної печі

Принцип роботи даної установки наступний: плавку металу здійснюють в графітовому тиглі, який розрахований на масу мідного розплаву до 2,2 кг. По струмопідводам в індуктор, який виготовлений з мідної водоохолоджувальної трубки, надходить змінний струм, і створює всередині індуктора змінний магнітний потік. Після чого, в металевій шихті, яка знаходиться в тиглі, утворюються струми Фуко, які забезпечують нагрів і плавлення металу. Схема індукційної печі зображено на рис. 2.3.

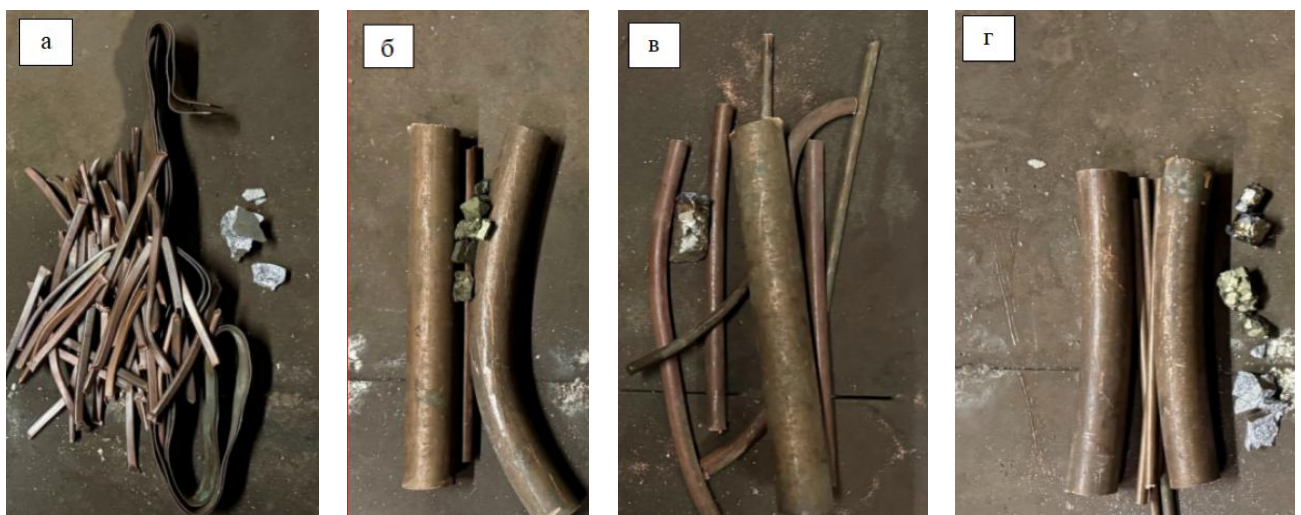


1 – метал; 2 – струмопідводи; 3 – тигель 4 – індуктор

Рисунок 2.3 – Індукційна тигельна піч [19]

2.3 Приготування розплавів

Приготування розплавів розпочалось із зважування шихти для завантаження в тигель, одержання розплав та майбутніх литих зразків. Зовнішній вигляд зважених шихтових матеріалів для кожного майбутнього зразку показано на рисунку 2.4.



а – Cu-5Cr; б – Cu-5V; в – Cu-5Zr; г – Cu-3Cr-3V-3Zr

Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд шихти для кожного майбутнього зразку

Піч, оснащenu графітовим тиглем спочатку прогрівали на невеликій потужності до моменту початку світіння тиглю і після цього завантажували мідь. При цьому, в робочу зону печі подавали аргон під невисоким тиском близько значень атмосферного, щоб забезпечити окислення графіту і самої міді. Процес нагрівання мідної шихти в графітовому тиглі зображено на рисунку 2.5.

Температуру як тигля, так і розплаву вимірювали за допомогою хромель-алюмелевої термопари, розміщеної в кварцевій трубці. Дані вимірювання температури виводились на цифрове табло вимірювального пристрою «Овен-ТРМ».



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд розпеченого тиглю з шихтою всередині

Навіть використовуючи захисне середовище, наявність кисню в розплаві буде зберігатися, тому до шихти перед моментом розплавлення було додано порошок бору, який виконує роль розкислювача і майже не впливає на кондуктивні властивості міді (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Додавання порошку бору

Розплав міді, після його утворення, постійно додатково перемішувався кварцовою трубкою, оскільки кварцове скло практично не взаємодіє з металевими розплавами до власної температури плавлення.

З метою отримання серії із чотирьох зразків мідних сплавів різного хімічного складу було проведено чотири окремі плавки за різних температур та різного часу витримки (табл. 2.3).

Температури перегріву розплавів та час їх витримки обирали відповідно до фазових діаграм стану, оцінюючи доцільність кожного з режимів. Хром розчинявся повільно, а його максимальний вміст при температурі до 1400 °C не мав би перевищувати (1,5–2) мас.%. Для ванадію вміст у розплаві не мав перевищувати (0,4–0,5) мас.%. Щодо цирконію – його можливо було ввести, відповідно до задуму, до 5 мас.%. Багатокомпонентний сплав готували, оцінюючи наявність шихти на поверхні розплаву і витримуючи протягом тривалого часу на рівні приготування розплавів з хромом та ванадієм.

Таблиця 2.3 – Вихідні умови для отримання розплавів

Розплав	Температура, °C	Час витримки, хв
Cu-Cr	1330	30
Cu-V	1350	20
Cu-Zr	1250	10
Cu-Cr-V-Zr	1350	25

Після того як розплав був готовий, його заливали в просушену при 200 °C мідну клиновидну форму (рис. 2.7). Це є необхідним для видалення вологи, через яку розплав може «вистрілити» з форми, насититись газами, тощо, а сам виливок може бути дефектним і непридатним для подальшого дослідження.

Мідна форма забезпечила досить швидку кристалізацію розплаву, швидкість якої збільшувалась з розширенням клину, тобто – з нижньої частини форми до верхньої. Це було потрібно для оцінки впливу швидкості охолодження розплаву на ступінь легованості матриці та дисперсність утворених зміцнюючих частинок.

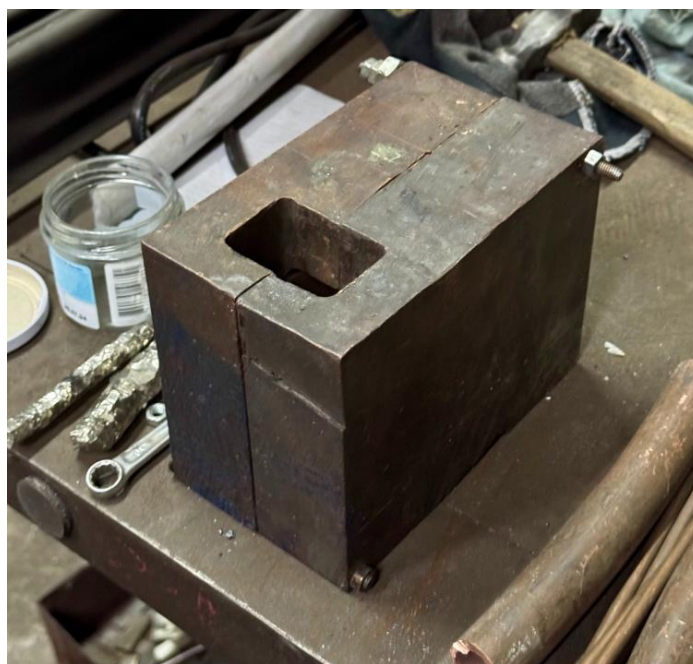


Рисунок 2.7 – Загальний вигляд мідної клиновидної форми

Одержані виливки експериментальних сплавів зображено на рисунку 2.8.

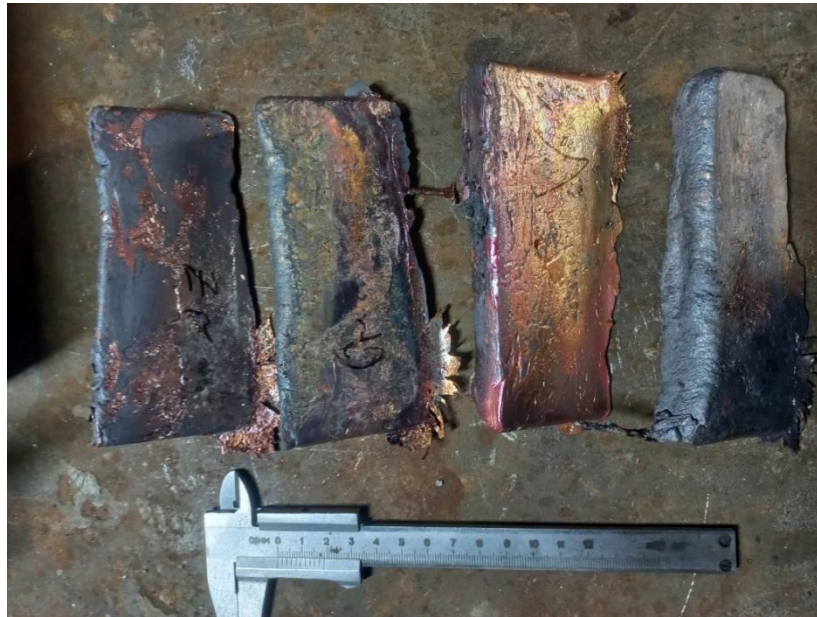


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд готових виливків

2.4 Термічна обробка для зразків системи Cu-Cr-V-Zr

Спираючись на фазові діаграми стану, для чотирьохкомпонентного сплаву, було вирішено провести термічну обробку з метою визначення особливостей зміни його структурно-фазових характеристик.

Термічну обробку проводили за допомоги лабораторної печі опору СНОЛ-7,2/1100 (рис. 2.9). Зразок сплаву розрізали на чотири частини. Для кожного зразка була створена індивідуальна схема ТО, яка включала гомогенізаційний відпал (нагрівання до 920 °С, витримка протягом 2 годин і повільне охолодження з піччю зі швидкістю приблизно (8–10) °С/хв), гартування (нагрівання до 920 °С, витримка протягом 2 годин і швидке охолодження у водному середовищі) та дисперсійне старіння (витримка загартованих зразків при температурах 320 °С і 580 °С протягом 3 годин).



Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд печі СНОЛ-7,2/1100 [24]

2.5 Методи дослідження структури та властивостей досліджуваних зразків

Для вивчення структури та властивостей, попередньо зразки були підготовлені. Їх вирізали із середини кожного зливка та механічно обробили, після чого було зроблено макрошліфи за стандартної методикою [25]. Макроструктура проявилась з використанням 5 % водного розчину хлориду заліза FeCl_3 . Такий травник є рекомендованим для мідних сплавів [26].

Аналіз хімічного складу проводили за допомоги рентгенофлуоресцентного спектрометра Expert 3L. Елементний аналіз проводиться від магнію до урану. Даний прилад працює на основі рентгенофлуоресцентного методу [27]. Даний метод проводиться шляхом реєстрації рентгенівського випромінювання, що виникає при взаємодії рентгенівських променів з атомами речовини [28].

Дослідження мікроструктури проводили за допомоги металографічного тринокулярного мікроскопу iScore IS.1053-PLMi та скануючого електронного мікроскопу Tescan Vega 3, оснащеною енергодисперсійним детектором Bruker, які зображено на рисунку 2.10.

а)



б)



а – Металографічний мікроскоп iScore IS.1053-PLMi; б – СЕМ Tescan Vega 3
Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд приладів для дослідження мікроструктури [17]

Мікротвердість вимірювали за методом Віккерса з навантаженням 25 г. за допомогою автоматичного мікротвердоміра LHVS-1000Z (рис. 2.11) [27].



Рисунок 2.11 – Зовнішній вигляд мікротвердоміра LHVS-1000Z

2.6 Висновки до розділу 2

1. В роботі реалізовано методичний та комплексний підхід до проведення експериментів та виконання досліджень. Це дозволило одержати необхідну кількість експериментального сплавів на основі міді та провести глибоку оцінку особливостей формування їх структурно-фазових характеристик.

2. Дослідження було присвячено виплавці сплавів систем Cu-Cr; Cu-Zr; Cu-V та Cu-Cr-Zr-V з використанням відходів міді та легуючих елементів.

3. Для отримання експериментальних сплавів використовувалась проста і технологічно прийнятна індукційна виплавка, яка забезпечує ефективне приготування мідних сплавів та їх лиття, включаючи приготування гомогенних розплавів монотектичних систем на основі міді з тугоплавкими компонентами – хромом і ванадієм.

4. Заливка розплавів здійснювалась у мідні кристалізатори для отримання дрібнозернистої структури та швидкої кристалізації литих зразків і для визначення впливу швидкості охолодження на структурно- та фазоутворення в них.

5. Окремо було проведено термічну обробку для сплаву системи Cu-Cr-Zr-V як такого, що дозволяє повною мірою оцінити особливості утворення зміцнюючих фаз різного хімічного складу.

6. Комплекс методів досліджень, які використовувались при виконанні роботи, дозволяє отримати необхідну інформацію про властивості експериментальних мідних сплавів.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз отриманих даних

Аналіз одержаних даних проводився на основі фундаментального принципу матеріалознавства: «фазовий склад – структура – властивості», тому що кожний наступний етап тісно залежний від попереднього.

3.2 Рентгенофлуорисцентний та спектральний аналізи хімічного складу досліджуваних мідних сплавів

Після проведення рентгенофлуоресцентного аналізу експериментальних зразків, було встановлено, що вони мають наступний хімічний склад (табл. 3.1), який відрізняється від очікуваного. Це пояснюється тим, що легуючі елементи обмежено розчинні в основі.

Таблиця 3.1 – Зведені дані рентгенофлуорисцентного аналізу

№	Зразок	Вміст елементів, мас.%, мідь – основа		
		Cr	Zr	V
1	Cu-Cr	1,18	-	-
2	Cu-V	-	-	0,29
3	Cu-Zr	-	3,95	-
4	Cu-Cr-V-Zr	0,66	0,54	0,22

Рентгенофлуорисцентний аналіз, не може показати відсотковий вміст бору, тому додатково провели спектральний аналіз (табл. 3.2), за допомогою приладу SPECTROMAXx arc / spark OES десятого покоління, який призначений для елементного аналізу багатьох сплавів, який використовує CCD-детектори реєстрації аналітичного сигналу, що забезпечує високу

точність проведення аналізу. Спектральний аналізатор, натомість не виявив ванадію.

Таблиця 3.2 – Зведені дані спектрального аналізу

№	Зразок	Вміст елементів, мас.%, мідь – основа		
		B	Cr	Zr
1	Cu-Cr	0,0013	1,29	-
2	Cu-V	0,00058	-	-
3	Cu-Zr	0,00035	-	3,57
4	Cu-Cr-V-Zr	0,00039	0,626	0,533

Зодержаних даних випливає, що цирконій легко та у великій кількості розчиняється в розплаві міді ближче до евтектичної концентрації, що є доволі очевидним. Така ж залежність спостерігається і для хрому. Розчинення ванадію відбувається залежно від температури і характеризується більш складним процесом. В розплаві можна досягти області гомогенності і розчинити його до вмісту (0,5–0,6) мас.%, але з падінням температури до початку перитектичного перетворення ванадій буде кристалізуватися в області монотектичного «куполу», коагулювати і спливати у вигляді твердих частинок. За їх виключенням мідна матриця завжди буде містити близько 0,3 мас.% ванадію, що відповідає його перитектичній концентрації.

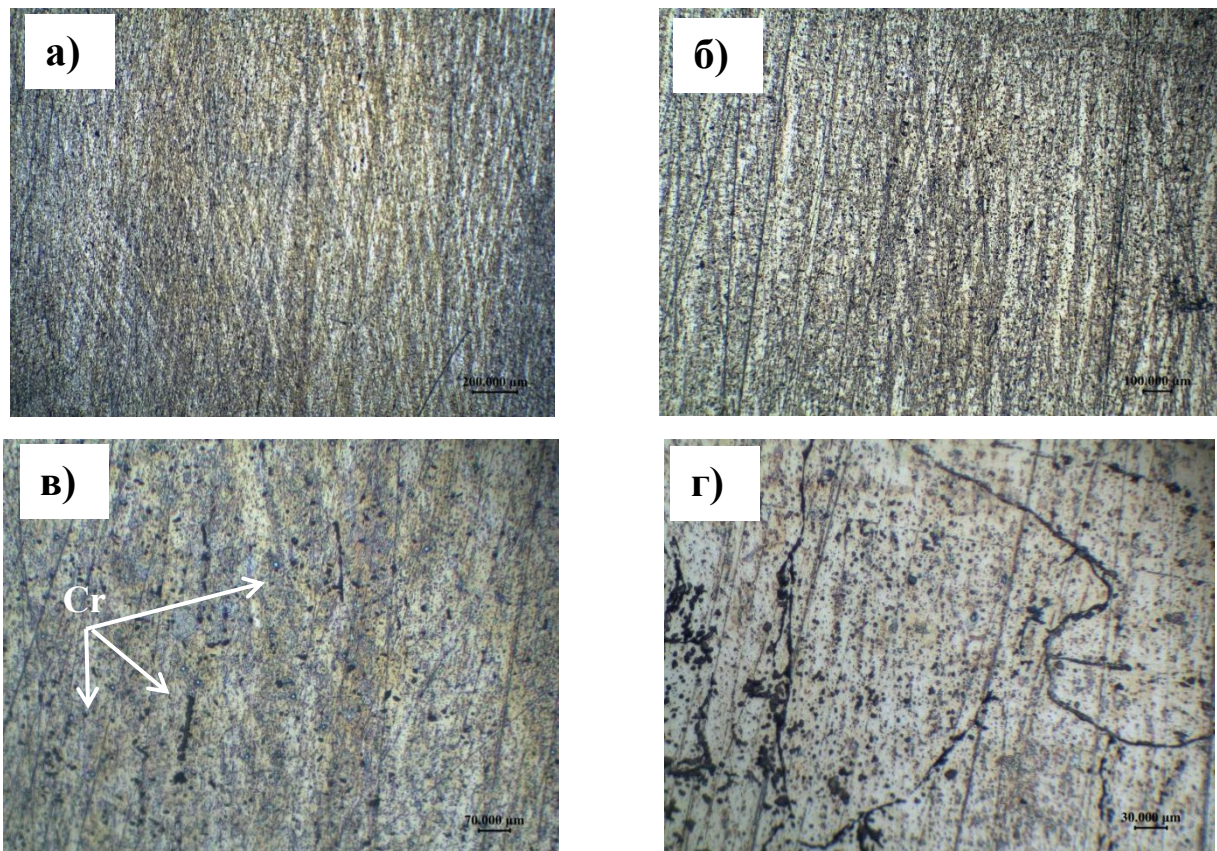
Одержання чотирьохкомпонентного сплаву не підтвердило гіпотезу щодо синергетичного впливу компонентів один на одного, що сприятиме підвищенню їх розчинення в розплаві. Натомість спостерігається зниження розчинності цирконію та хрому, що потребує пояснень.

Початковий вміст бору, який додавали для розкислення, складав приблизно 0,002 мас.%, але його не контролювали з високою точністю, адже це відповідало ціні поділки лабораторних вагів (0,02 г). Зниження вмісту бору в сплавах очевидно пов'язана з наявністю цирконію. Можна припустити, що чим більше легуючий елемент є схильним до окислення – тим більше він буде

приносити кисень в розплав і тим більше бор буде вигорати, реагуючи з киснем. Для більш точного аналізу цього питання буде проведено додаткові дослідження.

3.3 Оптична металографія досліджуваних мідних сплавів

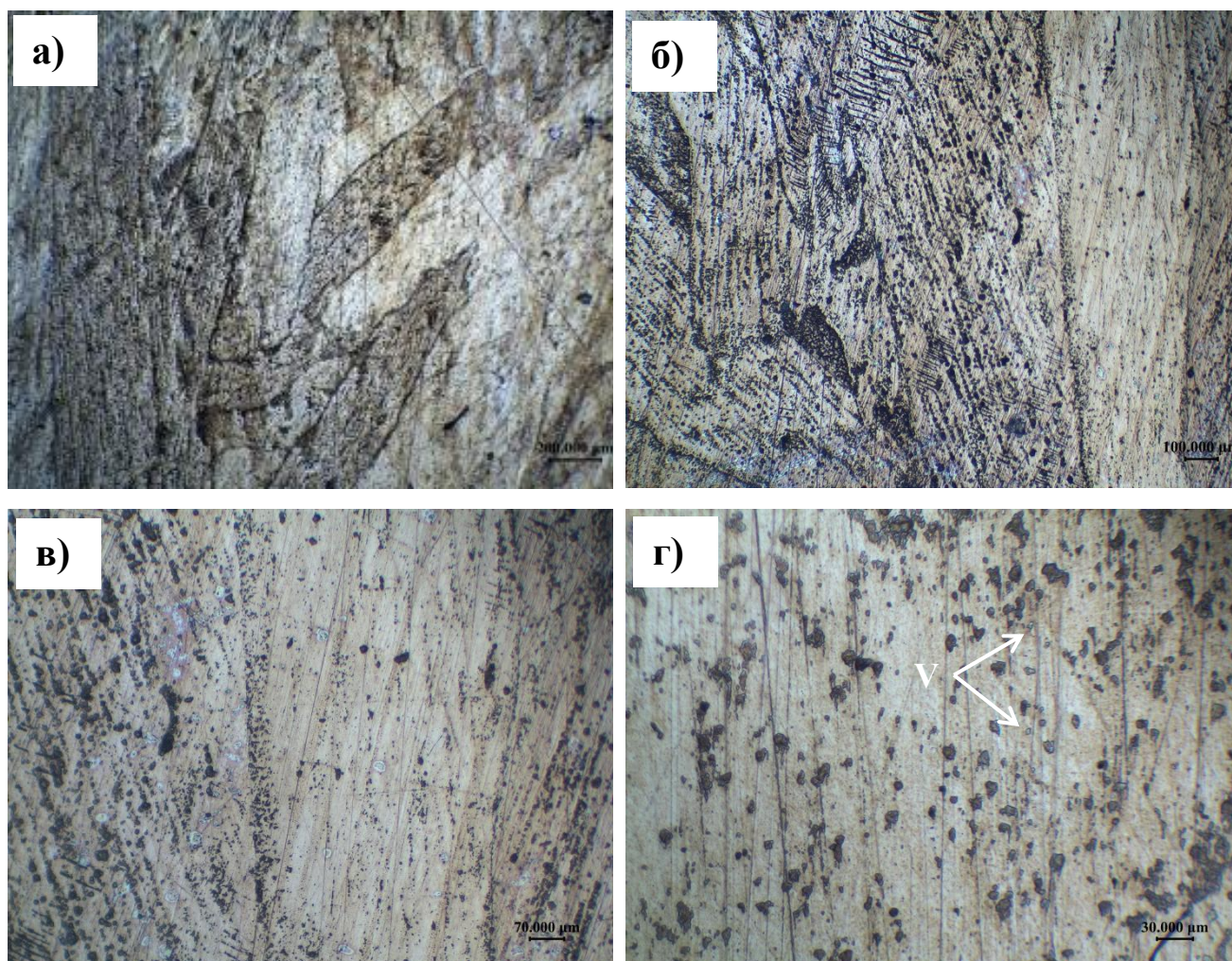
Мікроструктура сплаву Cu-Cr, де вміст хрому дорівнює 1,18 мас.%, представлена на рисунку 3.1. Даній структурі характерні дрібні, більш вузькі стовпчасті зерна. Довжина зерен складає кілька міліметрів, але ширина не перевищує 100 мкм. Оскільки хром кристалізується дуже швидко з розплаву, перегрів якого невеликий – розмір частинок є приблизно однаковим. Також чітко помітні чорні включення та стовпчики – це області, з яких випав хром під час механічної обробки зразків (шліфування і полірування).



а – 50 крат; б – 100 крат; в – 200 крат; г – 500 крат

Рисунок 3.1 – Мікроструктура Cu-Cr при різному збільшенні

На рисунку 3.2 зображено мікроструктуру сплаву системи Cu-V, де вміст ванадію становить 0,29 мас.%. Даній мікроструктурі характерні стовпчасті зерна. Можна помітити характерні скупчення смуг, які можуть свідчити про виникнення великої кількості дислокацій. Великі світлі зони могли утворитись внаслідок скупчення ванадію після процесу травлення. Також можна помітити чорні включення, які характерні наявністю бору або ванадію, який міг випасти в процесі механічної обробки.

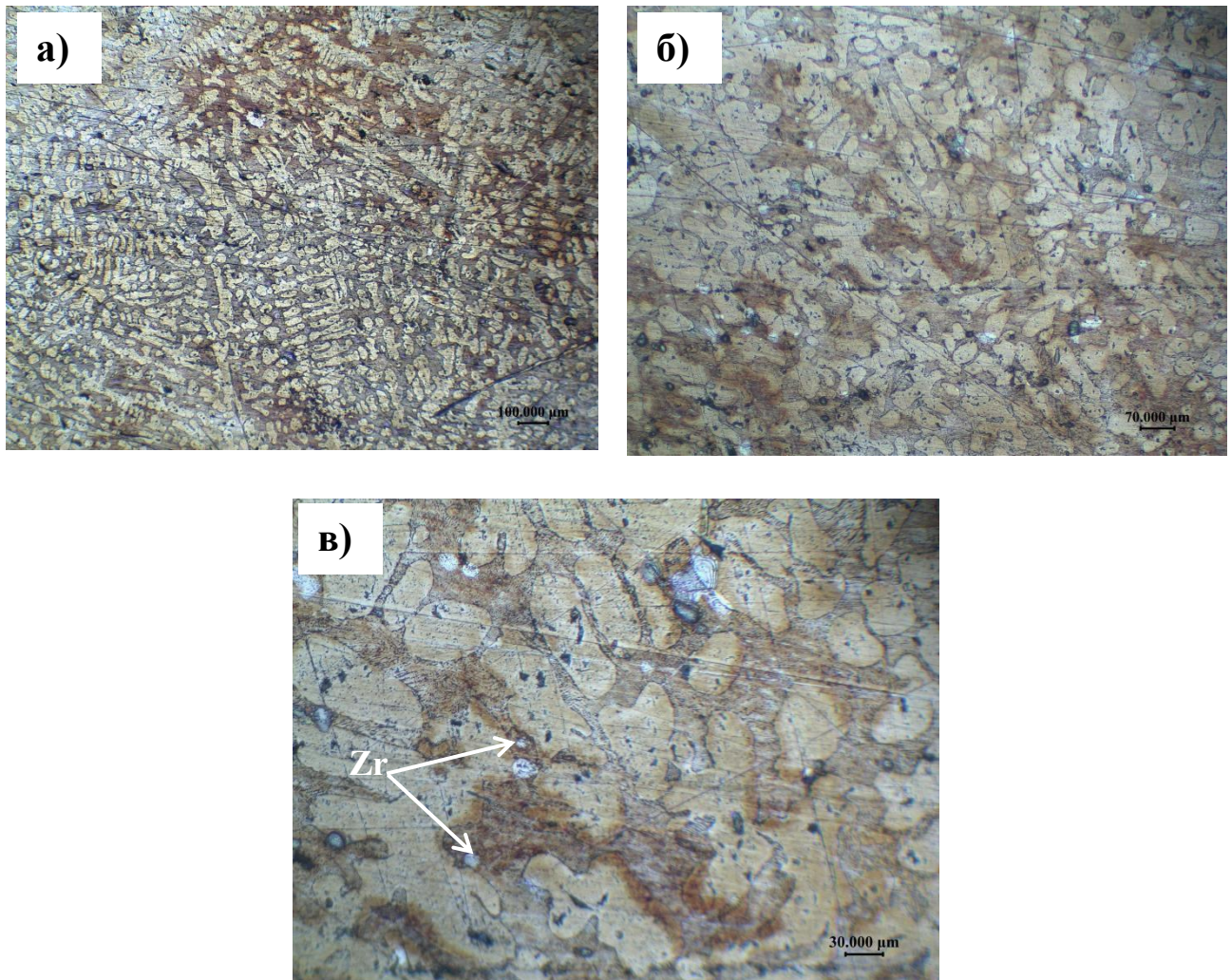


а – 50 крат; б – 100 крат; в – 200 крат; г – 500 крат

Рисунок 3.2 – Мікроструктура Cu-V при різному збільшенні

Для мікроструктури сплаву Cu-Zr, де вміст цирконію становить 3,95 мас.%, характерна дендритна форма зерен, характерна для утворення евтектики (рис. 3.3). Протяжність дендритів може досягати до 1 мм, ширина

дентритний гілок від 50 мкм до 200 мкм. Видимі чорні включення підтверджують наявність бору в складі сплаву.



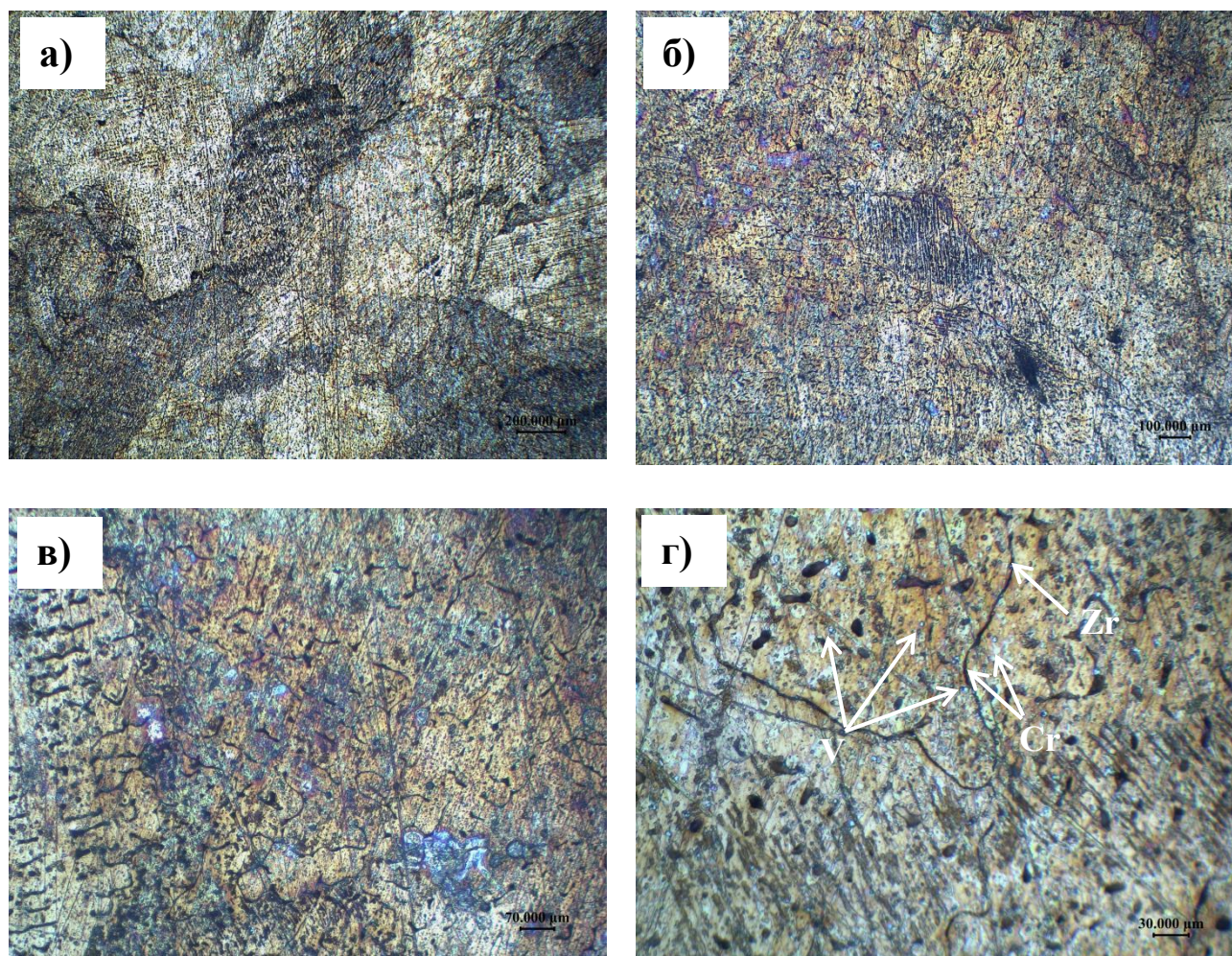
а – 100 крат; б – 200 крат; в – 500 крат

Рисунок 3.3 – Мікроструктура Cu-Zr при різному збільшенні

Мікроструктура сплаву системи Cu-Cr-Zr-V характеризується переважно не стовпчастою структурою та наявністю чітких меж зерен по яких зазвичай дислокуються включення хрому (рис. 3.4). Зерна рівновісні, розмір зерен всередньому від 100 мкм до 200 мкм. В середині зерен помітні дендрити, ширина гілки дендритів 30 мкм, а довжина від 70 мкм до 140 мкм, що говорить про те, що додавання цих 4 компонентів одночасно, суттєво подрібнює зерно.

Окрім меж зерен, хром може знаходитись у вигляді дрібнодисперсних включень поруч з дисперсними включеннями ванадію, що пояснюється

необмеженою розчинністю в рідкому стані ванадію та хрому один в одному. Ванадій формується у вигляді сферичних включень.



а – 50 крат; б – 100 крат; в – 200 крат; г – 500 крат

Рисунок 3.4 – Мікроструктура Cu-Cr-Zr-V при різному збільшенні

3.4 МікродюрOMETричний аналіз досліджуваних мідних сплавів

Мікротвердість чистої відпаленої міді становить $HV = 51$ [29]. Порівняльний аналіз експериментальних даних (табл. 3.3) показує значне підвищення мікротвердості всіх легованих зразків порівняно з чистою відпаленою міддю.

Обґрунтування цієї різниці пояснюється тим, що легуючі елементи блокують рух дислокацій під навантаженням індентора. У чистій відпаленій

міді внутрішні напруження зняті, тому атомні шари ковзають вільно. У системах Cu-Cr та Cu-Zr діє більш помітне дисперсійне зміцнення [30]. Хром і цирконій утворюють нанорозмірні частки та інтерметаліди, які стають механічними бар'єрами для мікродеформації [31]. Легуючі домішки також стримують ріст зерен за умов високих температур.

Відповідно до закону Холла-Петча, висока щільність меж зерен, тобто – висока дисперсність зеренної будови, створює додатковий опір зсуву, суттєво підвищуючи мікротвердість сплавів [30]. На додачу, за цією ж залежністю, в однофазних або умовно однофазних сплавах, що мають один домінуючий тип структурних складових, границя міцності прямопропорційна значенням твердості.

Таким чином, потенційно найбільш вдалим можна вважати чотирьохкомпонентний сплав, який одночасно має дрібнозернисту будову, однорідний розподіл мікротвердості та її високі значення.

Таблиця 3.3 – Зведені дані мікротвердості досліджуваних сплавів у двох зонах клиноподібного виливка

№	Зразок	Показники мікротвердості HV ²⁵	
		Верх	Низ
1	Cu-Cr	195,1	147,9
2	Cu-V	137,1	124,3
3	Cu-Zr	163,3	157,7
4	Cu-Cr-V-Zr	186,5	179,5

3.5 Дослідження впливу термічної обробки на структурно-фазові характеристики сплаву Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V

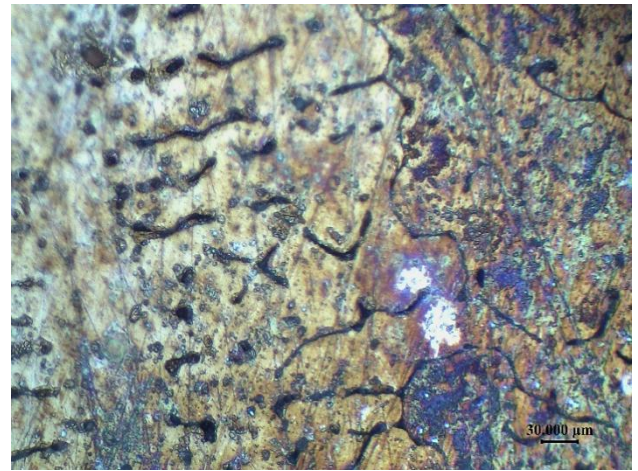
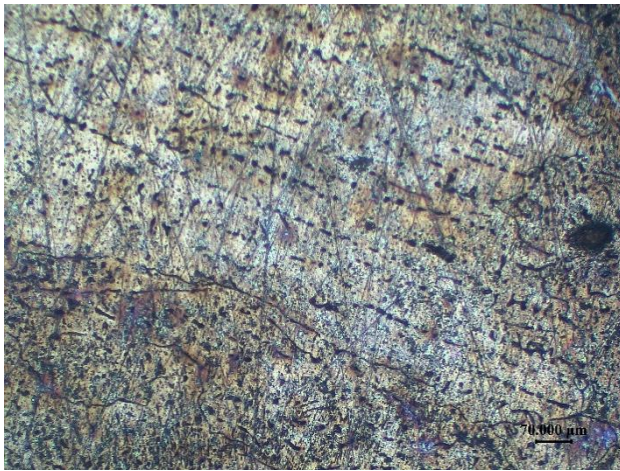
Як відомо, металеві сплави в литому стані часто характеризуються несприятливою дендритною структурою, яку важко змінити лише термічною обробкою без попередньої деформації. Особливо важко відбуваються

структурні зміни за наявності факторів, які затримують рекристалізацію в контексті зміни форми зерен без попередньої деформації. До них відносяться наявність евтектики та нерозчинних інтерметалідних фаз на межах зерен.

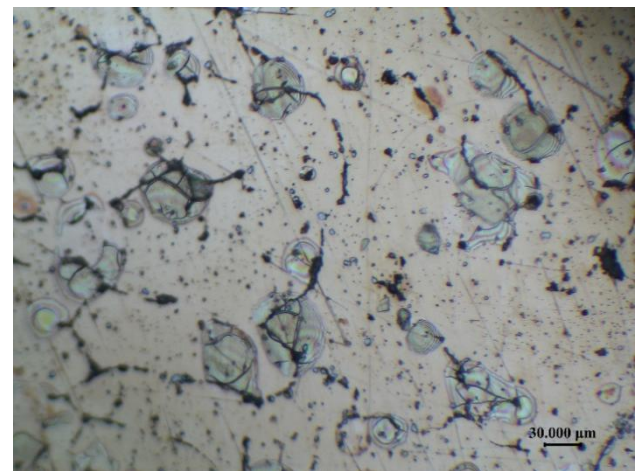
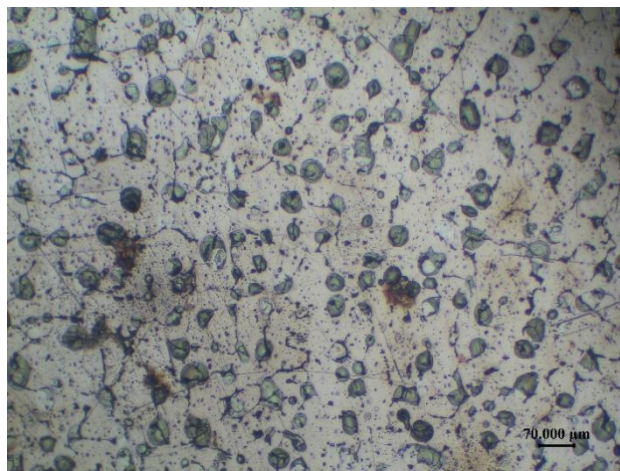
В сплаві $\text{Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V}$ концентрація всіх компонентів знаходиться на оптимальному для визначених досліджень рівні. Вміст хрому відповідає максимальній точці лінії «сольвус» при температурі $1070\text{ }^{\circ}\text{C}$, але наявність як ванадію так і цирконію може знизити його вміст в твердому розчині на основі міді, що дасть змогу розчинити частинки чистого хрому при температурах нижче визначених його фактичною концентрацією. При цьому, нерозчинний в мідній матриці цирконій також може перерозподілитися з інтерметалідної складової Cu_5Zr , яка має знаходитись на межах зерен в зоні існування евтектики, в частинки типу Cr_2Zr з розчиненням в них ванадієм. Також, з огляду на хімічний склад сплаву, в ньому може утворитися дана фаза за первинним механізмом, залишивши для знаходження в твердому розчині меншу кількість хрому та ванадію.

Перевірка цієї гіпотези здійснювалась в два етапи. Перший складався з порівняння змін мікроструктури сплаву, залежно від різних типів термічної обробки, а другий передбачав визначення локального хімічного складу структурних складових та їх мікротвердості.

На рисунку 3.5 наведено порівняння структури сплаву в литому стані та після відпалу. Показано, що в результаті відпалу дендритна структура литого металу зникає не повністю, а на межах зерен рівномірно утворюються фази, які не спостерігалися в литому стані. Середній розмір зерен при цьому зростає приблизно вдвічі.



а



б

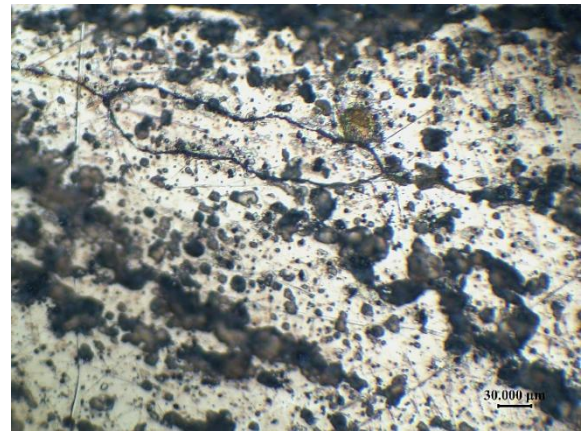
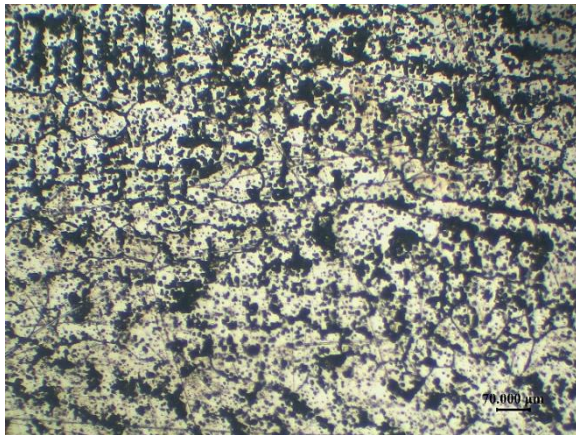
а – в литому стані; б – після відпалу

Рисунок 3.5 – Мікроструктура сплаву Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V

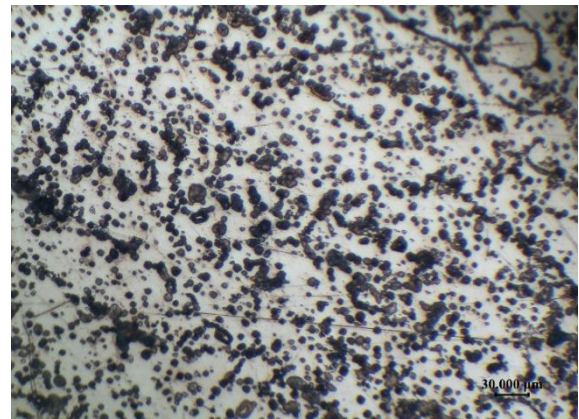
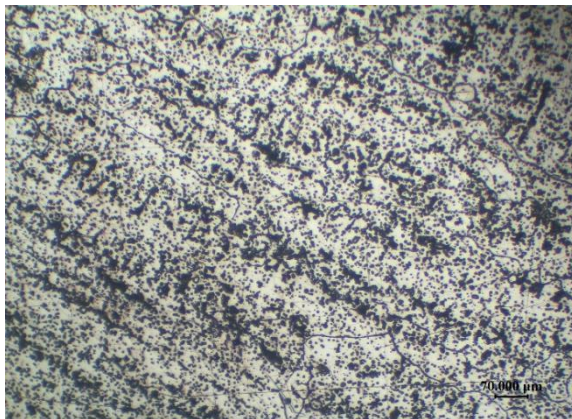
Дослідження мікроструктури загартованого стану (рис. 3.6, а) так само показало, що дендритна морфологія зерен зберігається схожою мірою, ніж після відпалу. При цьому, так само, частина зерен глобуляризується, а фази на межах зерен, як у відпаленому зразку, не утворюються. Загартований зразок демонструє наявність в зернах нерозчинених металевих частинок та грубі, більш неоднорідні, порівняно з відпаленим станом межі зерен, що може свідчити про активний дифузійний перерозподіл елементів на них.

Після старіння загартовані зразки демонструють більш чітку мікроструктуру (рис. 3.6, б, в). Після старіння при 320 °C межі зерен

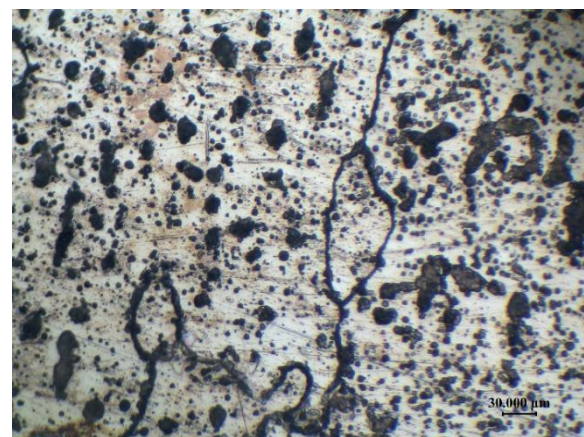
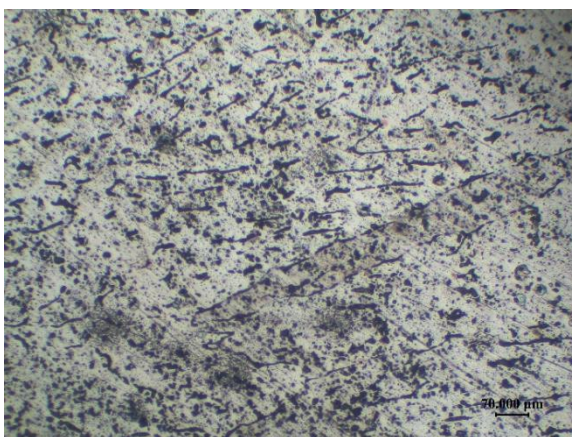
залишаються дещо грубими, а в середині мідної матриці спостерігаються рівномірно розподілені виділення зміцнюючих фаз розміром близько (2–5) мкм.



а



б



в

а – після гартування; б – після старіння при 320 °C; в – після старіння при 580 °C

Рисунок 3.6 – Мікроструктура сплаву Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V

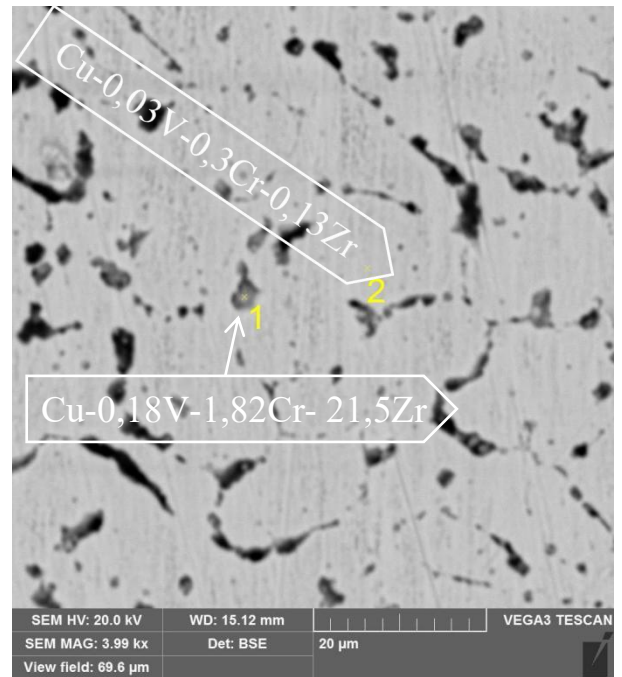
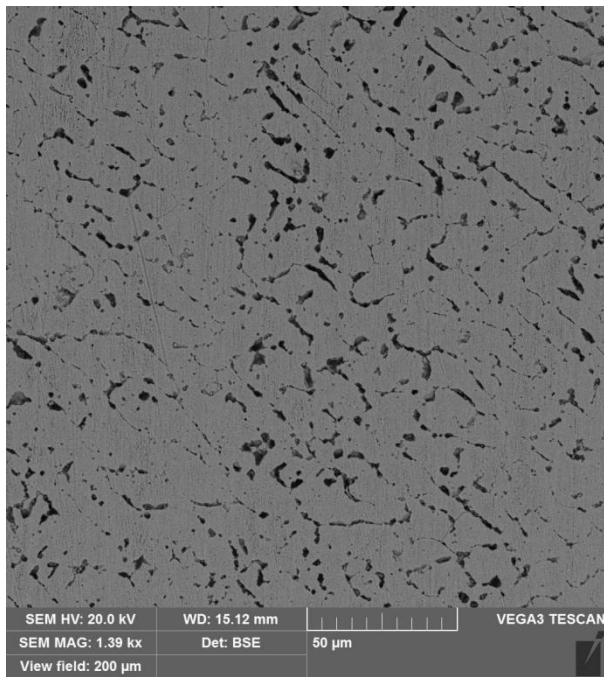
Старіння при 580 °С сприяє зникненню грубих меж зерен, імовірно через гомогенізацію та розчинення компонентів евтектики в матриці. При цьому, дисперсні частинки всередині зерен представлені двома типами фаз – менш дисперсними, які мають розміри порядку (2–5) мкм, як в попередньому випадку, та більш дисперсними, які мають розміри (10–20) мкм.

Для більш детальної оцінки особливостей структурно-фазового стану досліджуваних зразків було проведено електронно-мікроскопічні дослідження, які супроводжувались визначенням локального хімічного складу структурних складових. Так на рисунку 3.7, а показано, що в литому зразку зміцнюючі фази розташовані переважно на межах зерен і представлені частинками інтерметаліду Cu_5Zr з розчиненими в ньому хромом і ванадієм. Це є доволі очевидним та пояснюється тим, що цирконій не є розчинним в міді і утворений інтерметалід, згідно фазової діаграми стану, буде утворюватись в якості компонента евтектики.

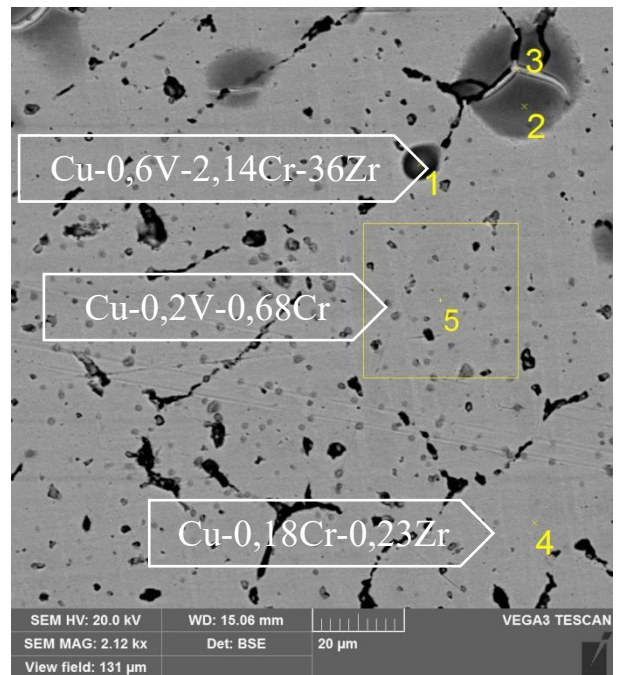
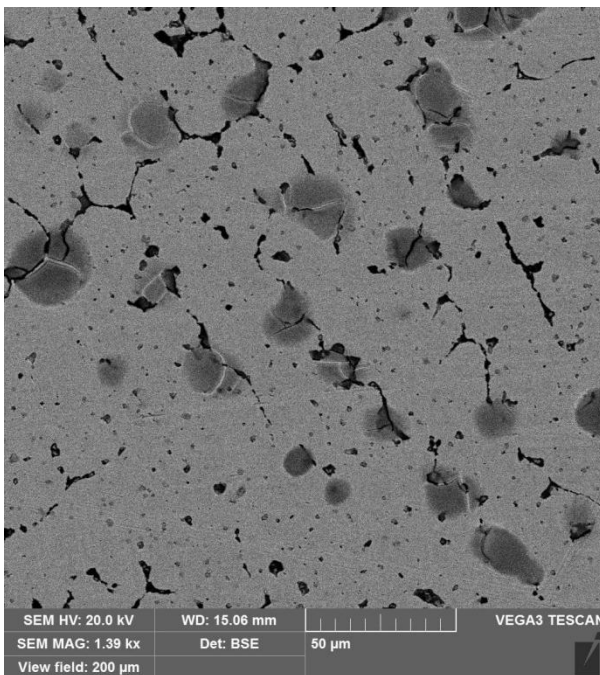
Твердий розчин на основі міді містить переважно хром, незначну кількість ванадію та цирконію. За пропорцією їхнього вмісту можна передбачити схильність до виділення в процесі термічної обробки інтерметаліду $(\text{Cr}, \text{V})_2\text{Zr}$ з твердого розчину при подальшому старінні.

Рівноважний відпалений стан (рис. 3.7, б) демонструє формування у сплаві більшої кількості складових. Проявляються чіткі фази $(\text{Cr}, \text{V})_2\text{Zr}$ на межах зерен (точка 1), з'являється метастабільна (не існує нижче 614 °С) фаза Cu_8Zr_3 , переважно на потрійних межах зерен (точка 2). Більш чітко проявляється джерело виникнення цієї фази – евтектична інтерметалідна складова Cu_5Zr (точка 3).

Твердий розчин на основі міді відпаленого зразка представлений зернами, які мають чітко відмінні ступені легування. Так в одному випадку (точка 4) можна спостерігати розчинення близько 0,18Cr та 0,23Zr (мас.%), а в іншому, який містить видимі зміцнюючі включення розмірами до 2 мкм – 0,2V та 0,68Cr (мас.%). Склад точки 4 також вказує на можливість формування інтерметаліду $(\text{Cr}, \text{V})_2\text{Zr}$ з твердого розчину при подальшому старінні.



а



б

а – в литому стані; б – після відпалу

Рисунок 3.7 – Мікроструктура та локальний хімічний склад структурних складових сплаву Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V

Гартування сплаву, як показано на рисунку 3.8, сприяє помітним структурним змінам. Нерозчинними залишаються фази типу Cu_8Zr_3 . При цьому

варто відмітити, що вони глобуляризуються і містять в рази менше ванадію і хрому (в 10 і 2,5 рази відповідно), ніж у відпаленому стані. Розташування таких частинок не на межах зерен вказує на те, що вони не надто перешкоджають їх зростанню при підвищених температурах. В твердому розчині на основі міді при цьому, вдається розчинити близько 1 мас.% легуючих елементів. Нерозчиненими залишаються переважно найбільш високотемпературні фази $(Cr,V)_2Zr$, але точно їхній хімічний склад визначити неможливо через суттєво менший розмір частинок, який складає приблизно (1–2) мкм, по відношенню до розміру скануючого зонда (5 мкм).

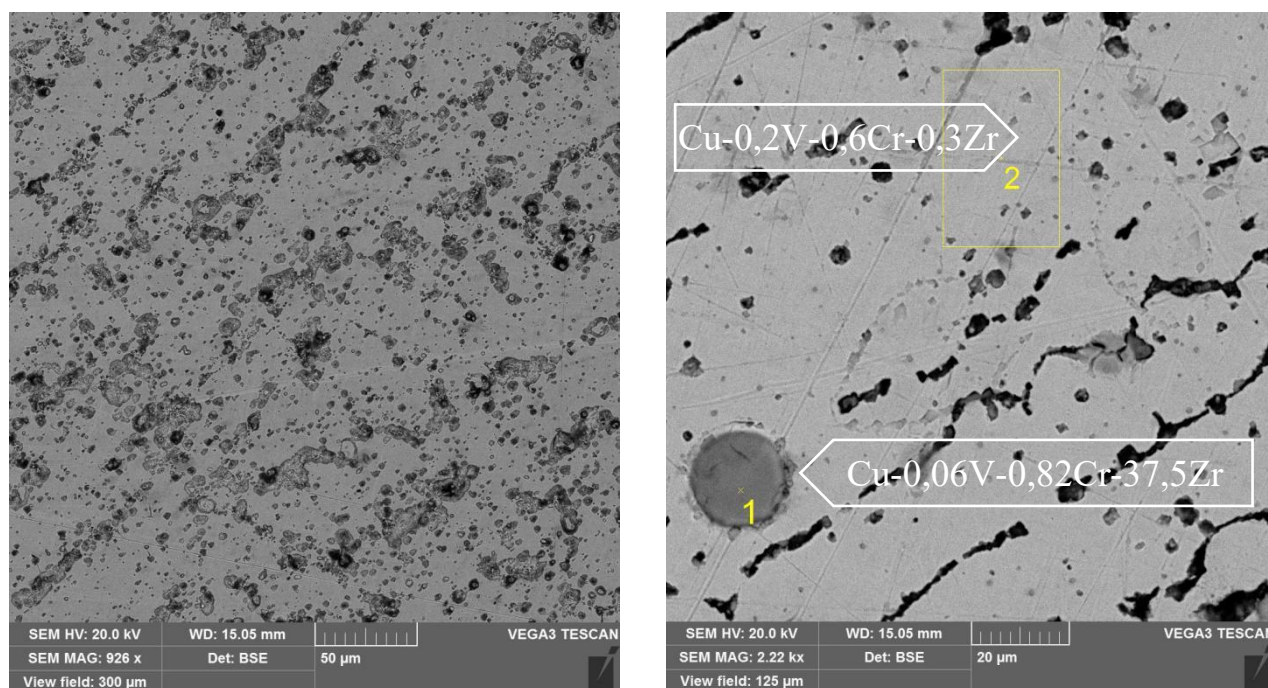
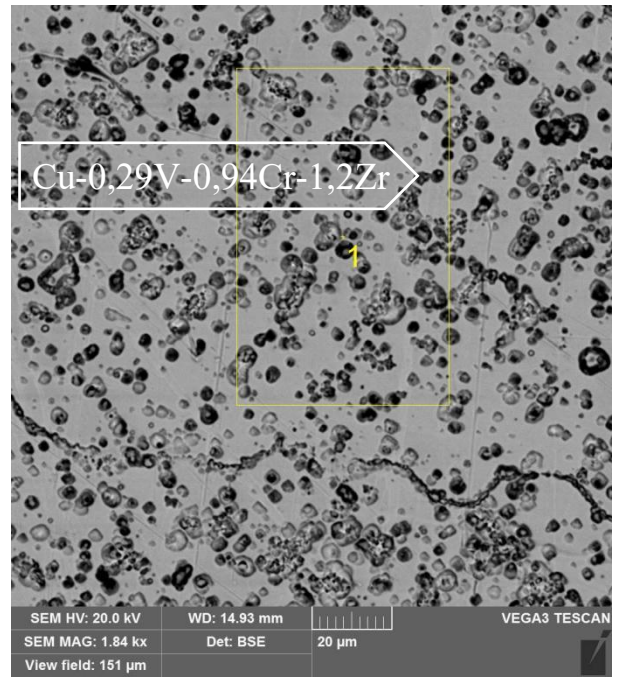
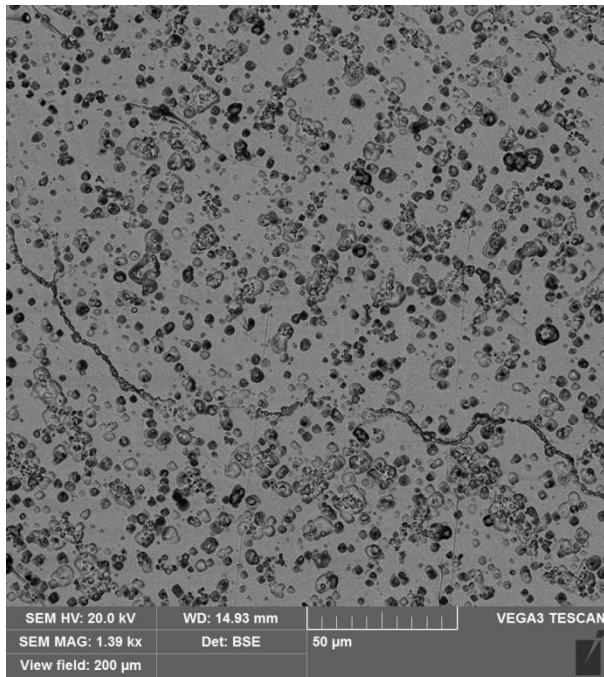
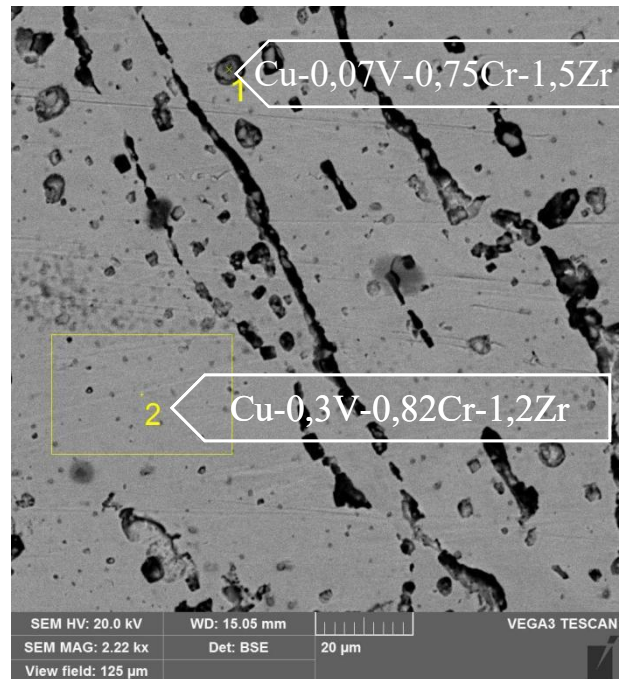
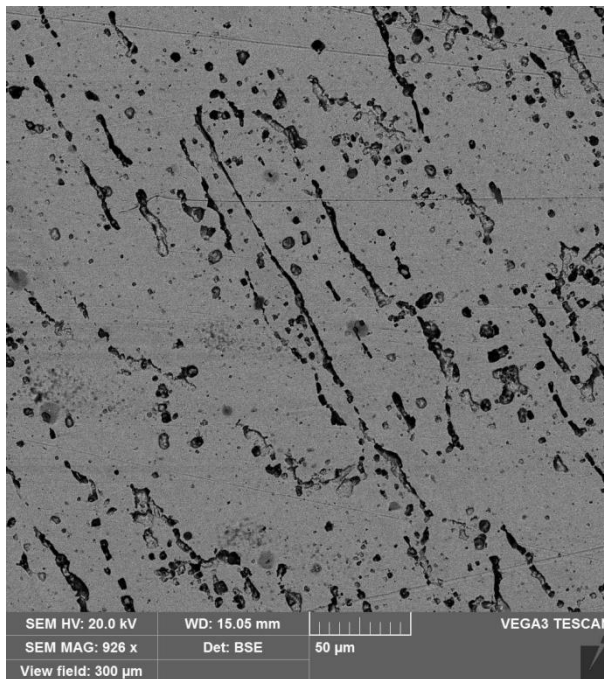


Рисунок 3.8 – Мікроструктура та локальний хімічний склад структурних складових сплаву Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V після гартування

Старіння загартованих зразків (рис. 3.9) демонструє суттєву залежність структурно-фазового стану сплаву від температури. Старіння при 320 °C сприяє рівномірному виділенню дисперсних частинок, точний хімічний склад яких визначити так само важко через маленькі розміри. При цьому, локальний хімічний склад зерен з виділеними фазами містить сумарно близько 2,5 мас.% легуючих елементів (рис. 3.9, а).



a



б

а – після старіння при 320 °C; б – після старіння при 580 °C

Рисунок 3.9 – Мікроструктура та локальний хімічний склад структурних складових сплаву Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V

Високий вміст цирконію в даному випадку вказує на захоплення областей існування евтектики, а форма частинок – на можливість ефективного її подрібнення під впливом високих температур.

Підвищення температури старіння призводить до коагуляції дисперсних частинок і формуванню різних структурних зон з близьким хімічним складом (рис. 3.9, б, точки 1 і 2), що вимагає додаткових пояснень.

Для встановлення особливостей зміни мікромеханічних властивостей досліджуваного сплаву було виміряно мікротвердість зерен та їх меж в усіх станах, для яких проведено мікроструктурні дослідження. Одержані дані приведені в таблиці 3.4, показали, що потенційно найбільше зміцнення повинен мати сплав після гартування і старіння при 320 °С, а найбільшу однорідність властивостей – сплав у литому стані, що пояснюється незначною різницею мікротвердості зерен і їх меж при тому, що в цьому стані сплав має досить однорідну будову цих структурних складових та наявність в них всіх типів дисперсних інтерметалідів.

Таблиця 3.4 – Мікротвердість сплаву Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V в литому стані та після термічної обробки

Стан	Мікротвердість, HV ²⁵	
	Матриця	Межі зерен
Литий	167	152
Відпалений (920 °С, 2 год, охолодження з піччю)	127	144
Загартований (920 °С, 2 год, охолодження у воді)	152	138
Старіння після гартування при 320 °С, 3 год)	179	182
Старіння після гартування при 580 °С, 3 год)	196	163

Важливою ознакою інтенсивного перерозподілу в міді хрому, цирконію та ванадію стала зміна мікротвердості матриці та меж зерен у сплаві після гартування та високотемпературного старіння. Найвища мікротвердість матриці та досить високі її показники в межах зерен свідчать одночасно і про високу

дифузійну активність компонентів і про їх інтенсивну взаємодію між собою. За одержаних значень мікротвердості можна стверджувати, що такий сплав може бути одночасно міцним, але і крихким та схильним до зернограничного руйнування, що додатково підтверджується наявністю більш крупних, ніж в зразку після низькотемпературного старіння, частинок інтерметалідів на межах зерен.

Важливо, що одержані дані стосуються литого стану сплаву і дозволяють оцінити структурно-фазові зміни в не найкращих характеристиках вихідної структури. При цьому, показано, що існуючі дисперсні частинки досить ефективно блокують зростання зерен при тривалому високотемпературному впливі. Також показано, що гартування зменшує анізотропію властивостей і може бути сприятливим для проведення деформаційної обробки сплаву, що планується провести в майбутньому.

3.6 Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що фактичний хімічний склад отриманих сплавів відрізняється від розрахункового, що обумовлено обмеженою розчинністю легуючих елементів у мідній матриці та особливостями їх кристалізації.

2. Показано, що цирконій та хром характеризуються порівняно високою розчинністю в міді. Встановлено, що поведінка ванадію є більш складною та визначається температурними умовами. У рідкому стані можливе його розчинення до (0,5–0,6) мас.%, однак при охолодженні відбувається виділення надлишкового ванадію внаслідок перитектичних та монотектичних процесів. У мідній матриці стабільно утримується близько 0,3 мас.% ванадію.

3. Показано, що одночасне введення Cr, Zr та V не впливає на взаємне підвищення розчинності компонентів у міді. Навпаки, у чотирикомпонентному сплаві зафіксовано зниження розчинності хрому та цирконію.

4. Встановлено, що вміст бору після плавлення знижується порівняно з початковим. Імовірною причиною є його взаємодія з киснем, який надходить у

розплав разом із легуючими компонентами, особливо елементами з високою схильністю до окиснення.

5. Металографічні дослідження показали суттєвий вплив складу сплавів на характер формування мікроструктури: для сплаву Cu-Cr характерна дрібна стовпчаста структура; сплав Cu-V характеризується стовпчастими зернами та локальними неоднорідностями; у системі Cu-Zr формується виражена дендритна структура евтектичного типу; у сплаві Cu-Cr-V-Zr спостерігається формування більш дрібної рівновісної структури з дендритними складовими та дисперсними включеннями.

6. Встановлено, що комплексне легування Cu-Cr-V-Zr сприяє суттєвому подрібненню зеренної структури. Середній розмір зерен зменшується до (100–200) мкм, що вказує на ефективне модифікування процесів кристалізації.

7. Всі досліджені сплави характеризуються значно вищими, в (2,5–3,5) разів, значеннями мікротвердості порівняно з чистою відпаленою міддю.

8. Найвищі та найбільш однорідні значення мікротвердості сплавів в литому стані, встановлено для чотирикомпонентного сплаву Cu-Cr-V-Zr (186,5–179,5) HV, що пов'язано з формуванням дрібнозернистої структури та рівномірним розподілом зміцнювальних фаз.

9. Сплав Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V у недеформованому стані має стійку дендритну структуру, яка не усувається повністю термічною обробкою. Це відбувається за рахунок наявності евтектики та нерозчинних інтерметалідних фаз на межах зерен, які ефективно затримують процеси рекристалізації та зміну форми зерен.

10. Встановлено, що інтерметаліди Cu_5Zr , досліджуваного мідного чотирьохкомпонентного сплаву в литому стані, локалізуються на межах зерен у складі евтектики, а мідна матриця містить більше хрому – 0,3 мас.%, менше цирконію – 0,13 мас.% та ще менше ванадію – 0,03 мас.%.

11. Відпал досліджуваного чотирьохкомпонентного мідного сплаву частково усуває дендритну морфологію зерен, а також ініціює зміни фазового

складу порівняно із литим станом: формуються частинки $(\text{Cr,V})_2\text{Zr}$ на межах зерен та метастабільна фаза Cu_8Zr_3 на потрібних межах зерен. Це пояснюється активним перерозподілом цирконію з інтерметалідної складової та його взаємодією з хромом та ванадієм.

12. Процес гартування при 920°C чотирьохкомпонентного досліджуваного мідного сплаву, дозволив розчинити приблизно 1 мас.% легуючих елементів в твердому розчині на основі міді. При цьому відмічається нерозчинність фаз $(\text{Cr,V})_2\text{Zr}$ розміром (1–2) мкм, що вказує на їх високу термічну стабільність.

13. Процес старіння після гартування досліджуваного сплаву $\text{Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V}$ має різний ефект залежно від температури: при 320°C досягається високий рівень мікротвердості матриці та меж зерен (179–182) HV за рахунок рівномірного виділення дисперсних зміцнюючих фаз $(\text{Cr,V})_2\text{Zr}$, частинки хрому з розчиненим в ньому ванадієм, тоді як підвищення температури до 580°C сприяє максимального зміцнення матриці (196 HV) при одночасному зниженні мікротвердості меж зерен до 163 HV внаслідок коагуляції інтерметалідів, що підвищує ризик схильності матеріалу до крихкого та зернограничного руйнування.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність

Електротехнічний напрямок постійно потребує розвитку, а саме створення нових жароміцних сплавів, які можна використовувати в умовах високого струму та підвищених температур. Особливо дані сплави затребувані в комутаційному обладнанні та електричному транспорті. В світі є багато електротехнічних систем, які мають навантаження на високострумкові вузли, які нагріваються під час роботи. Наприклад, в метрополітені під вагонами розташовані деталі струмоприймача, які безпосередньо торкаються контактної рейки, під час контакту одне з одним виникає електрична дуга, температура якої більше ніж 1000 °С. Деталі із чистої міді локально плавляться і швидко зношуються. У результаті чого витрачається час на заміну деталі, сама деталь стає «одноразовою» і в цілому порушуються процес роботи. Всі наведені фактори вказують на те, що це економічно не вигідно.

Саме тому, сплави на основі міді, які леговані хромом, цирконієм та ванадієм є ефективними. Завдяки легуючим елементам утворюються дисперсні зміцнюючі фази, які подрібнюють структуру та підвищують міцність, не втрачаючи електропровідність. Термін служби таких сплавів в середньому в 5 разів вище чистої міді.

4.2 Розрахунок витрат на проведення дослідження

Сума, необхідна для виготовлення та досліджень мідних сплавів, визначаються наступними складовими витратами: витрати на оплату праці, відрахування на загальнодержавне соціальне страхування, витрати на матеріали для проведення дослідження, витрати на енергоносії, інші безпосередні витрати, а також інші загальні витрати.

4.2.1 Витрати на оплату праці

Витрати за цією статтею включають заробітну плату безпосередніх виконавців теми, а заробітна плата адміністративно-управлінського персоналу, працівників дослідних виробництв включаються в кошторисну вартість теми через статтю «Накладні витрати» [32, 33].

Витрати на оплату праці розраховують на основі даних про трудомісткість окремих робіт по темі (табл. 4.1) та посадових окладів безпосередніх їх виконавців (табл. 4.2). Розрахунки проводяться згідно системи людина-день, щоденна заробітна плата формується як відношення місячного окладу до календарного місяця [32, 33].

Таблиця 4.1 – Трудомісткість виконання дипломної роботи

Найменування робіт	Трудомісткість за виконавцями, люд-днів			
	Доктор технічних наук	Інженер- дослідник	Технік	Лаборант
1. Уточнення та конкретизація завдань по темі дослідження	3	3	—	—
2. Аналіз науково-технічних публікацій по темі дослідження	5	30	—	—
3. Обґрунтування мети та напрямів дослідження	2	2	—	—
4. Розробка методики проведення дослідження	2	2	2	1
5. Проведення дослідження	7	15	2	3
6. Обговорення результатів дослідження	3	3	—	1
Усього	22	55	4	5

Середньоденна заробітна плата за категоріями виконавців розраховується шляхом ділення їх посадового місячного окладу на 21,2 (де 21,2 – усереднене число робочих днів за місяць) [32, 33].

Таблиця 4.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

Посада виконавців	Планова трубомісткість, люд-днів	Заробітна плата, грн		
		Посадовий місячний оклад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
Доктор технічних наук	22	24539,3	1157,5	25465
Інженер-дослідник	55	11630	548,58	30171,9
Технік	4	9446	445,56	1782,24
Лаборант	5	7473	352,5	1762,5
Разом оплата праці				59181,64

Враховуючи трудомісткість кожного з учасників та його заробітну плату, отримано фонд заробітної плати для наявних досліджень. Фонд заробітної плати (ФЗП) даної науково-дослідної роботи складає 59181,64 грн.

4.2.2 Єдиний соціальний внесок

Зідно з частиною 5 статті 8 Закону України № 2464-VI, ставка єдиного соціального внеску (ЄСВ) з 1 січня 2016 р. складає 22 % від фонду заробітної плати [32, 33]:

$$\text{ЄСВ} = \text{ФЗП} \cdot 0,22 = 59181,64 \cdot 0,22 = 13019,96 \text{ грн.},$$

де ФЗП – фонд заробітної плати.

4.2.3 Витрати на матеріали, для проведення дослідження

Під час досліджень було використано шихтові матеріали, технологічні матеріали для проведення термічної обробки, розхідні матеріали та хімічний реактив. Найменування, стандарти, кількість та сума наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахунок витрат на матеріали

Найменування	Стандарт, технічні умови	Одиниця виміру	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Мідь МЗ	ГОСТ 859-2001	кг	6	500,00	3000,00
Ванадій ВнМ-1	ТУ 48-4-272-73	кг	0,1	4400,00	440,00
Хром ПХА	ТУ 14-00186482-051-2005	кг	0,08	946,00	76,00
Цирконій КТЦ марки Б	ТУ 25012091.00 1-94	кг	0,09	980,00	88,00
Бор марки Б-95	ГОСТ 5744-85	кг	0,0006	45000,00	270,00
Аргон газоподібний, сорт вищий	ГОСТ 10157-79	л	1	30,00	30,00
Графітовий тигель	—	шт	1	540,00	540,00
Загальні витрати на матеріали					4444,00

Транспортно-заготівельні витрати приймаємо на рівні 10 % від планової вартості загальних витрат на матеріали:

$$T_v = 4444 \cdot 0,1 = 444 \text{ грн.}$$

Тоді загальна сума витрат на закупівлю матеріалів та їх транспортування буде становити:

$$B_{\text{м}} = 4444 + 444 = 4888 \text{ грн.}$$

4.2.4 Витрати на енергоносії для проведення досліджень

Виконання даної дипломної роботи пов'язане з проведенням індукційної плавки, термічної та механічної обробки. Оскільки дослідження проводились на промисловому об'єкті, тому ціна 1 кВт/год = 12,50 грн. З урахуванням всіх процесів, було витрачено приблизно 85 кВт. Повна сума витрачених коштів на енергоносії складає 1062,5 грн.

4.2.5 Витрати на спеціальне обладнання

Виконання даної дипломної роботи не передбачає потребу в купівлі спеціального обладнання, тому за даною статтею витрати відсутні.

4.2.6 Витрати на послуги сторонніх організацій

Виконання даної дипломної роботи не передбачає використання послуг сторонніх організацій, тому за даною статтею витрати відсутні.

4.2.7 Витрати на службові відрядження

Під час виконання дипломної роботи службові відрядження не проводились, тому за даною статтею витрати відсутні.

4.2.8 Інші прямі невраховані витрати

В даній статті вказані сумарно всі витрати для проведення науково-дослідної роботи (НДР), які не були враховані у попередніх статтях. Розрахунок інших прямих витрат при проведенні роботи складає 10 % від суми врахованих витрат на виконання НДР [32, 33]. Тому:

$$I_g = (59181,64 + 13019,96 + 4888 + 1062,5) \cdot 0,1 = 7815,21 \text{ грн.}$$

4.2.9 Накладні витрати

У даній статті розраховуються витрати, пов'язані з управлінням організацією-виконавцем теми, витрати на винахідництво і раціоналізацію; витрати на амортизацію основних засобів; витрати на науково-технічну інформацію; витрати на забезпечення нормальних умов праці і техніки безпеки; витрати на оплату послуг банків; податки, збори та інші обов'язкові платежі і витрати тощо.

У межах цього розрахунку накладні витрати пропорційні сумі прямих витрат на рівні 20 % [32, 33].

$$H_g = (59181,64 + 13019,96 + 4888 + 1062,5 + 7815,21) \cdot 0,2 = 17193,89 \text{ грн.}$$

4.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Формування планової калькуляції витрат для проведення НДР складається на основі виконаних розрахунків та нормативних даних (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1.Витрати на оплату праці	59181,64	Відповідно до розрахунків
2.Єдиний соціальний внесок	13019,96	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3.Матеріали для проведення досліджень	4888,00	Відповідно до розрахунків
4.Енергоносії для проведення досліджень	1062,5	Відповідно до розрахунків
5.Спецобладнання для наукових цілей	—	Не передбачено
6.Вартість послуг сторонніх організацій	—	Не передбачено
7.Витрати на службові відрядження	—	Не передбачено
8.Інші невраховані прямі витрати по темі	7815,21	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9.Накладні витрати	17193,89	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
10.Усього витрат по темі	103161,2	Сума попередніх статей

4.3 Науково-технічна ефективність НДР

Для визначення доцільності проведення даної роботи потрібно розрахувати очікуваний економічний ефект НДР. Потрібно зазначити, що даний розрахунок лише використовується для НДР, яка сфокусована на створенні нових матеріалів, покращення параметрів якості продукції та

створення нових конструкцій. Для визначення річного економічного ефекту використовується бальна система оцінювання економічної ефективності з використанням наступних показників:

- важливість розробки (K_1);
- можливість використання результатів розробки (K_2);
- теоретичне значення та рівень новизни (K_3);
- складність дослідження (K_4).

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- в) робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- г) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- д) робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:

- а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.
- г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;
- д) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:

а) робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;

б) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

г) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики тощо – 6 балів;

д) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:

а) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;

б) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;

в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;

г) робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;

д) робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів:

$$B = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

Тоді, загальна бальна оцінка ефективності згідно таблиці 4.5 становить:

$$B = 3 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 7 = 315$$

Таблиця 4.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1. Важливість розробки	K_1	Робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів розробки	K_2	Результати розробки можуть бути використані декількома організаціями	5
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	3
4. Складність дослідження	K_4	Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	7

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^{\text{У}} = 500 \cdot B - E_{\text{Н}} \cdot B_{\text{НДР}},$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

$E_{\text{Н}}$ – нормативний коефіцієнт економічної ефективності;

$B_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР.

Тоді, умовний ефект НДР становить:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 315 - 0,27 \cdot 103161,2 = 129646,47 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом умовної економічної ефективності E_e . Він є відношенням умовного ефекту виконання НДР до сім'яних витрат і розраховується за формулою:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{B_{\text{НДР}}}$$

Тому для даної дипломної роботи коефіцієнт умовної економічної ефективності становить:

$$E_e = \frac{129646,47}{103161,2} = 1,25$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності НДР становить 1,25 ($E_e > 1$), що свідчить про доцільність виконання.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Розраховано планову калькуляцію витрат дипломної роботи, що складає 103161,2 грн.
2. Розраховано загальну бальну оцінку, що складає 315.
3. Проведені розрахунки та їх аналіз, підтверджують доцільність виконання дипломної роботи.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

Даний розділ присвячується аналізу потенційних небезпек, що можуть виникнути в процесі експериментальних робіт із виготовлення мідних сплавів, легованих хромом, цирконієм та ванадієм, шляхом індукційної виплавки. Також, велику увагу приділено на розгляд заходів щодо забезпечення безпечних умов праці.

Науково-дослідницька робота виконувалась у відділі процесів плавки та рафінування сплавів у виробничому цеху фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України (ФТІМС).

Метою даного розділу є аналіз умов праці на робочому місці, визначення небезпечних та шкідливих факторів, які виникають під час індукційної плавки сплавів.

5.1 Правові основи охорони праці

Закон України «Про охорону праці» визначає основні положення щодо реалізації конституційного права працівників на охорону їх життя і здоров'я у процесі трудової діяльності, на належні, безпечні і здорові умови праці і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні [34].

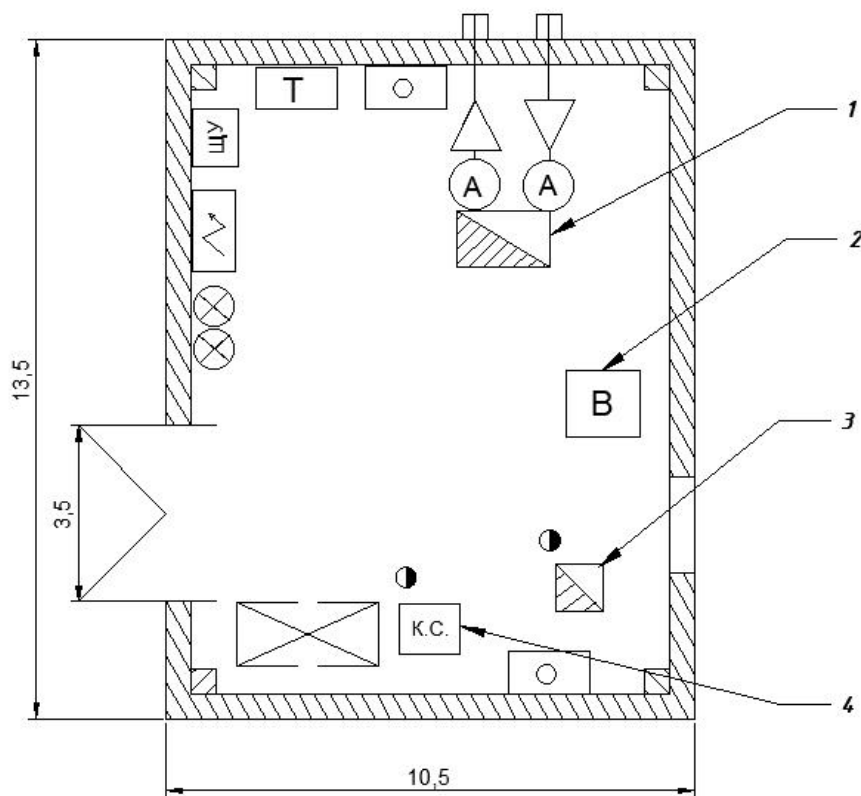
Роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці (ст. 13 Закону України «Про охорону праці») [34].

Згідно статті 14 Закону України «Про охорону праці» Працівник зобов'язаний дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку і здоров'я оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт чи під час перебування на території підприємства, а також знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці, правила поведінки з машинами,

механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту [34].

5.2 Аналіз параметрів приміщення

Дослідження для виконання науково-дослідної роботи проводились в приміщенні виробничого цеху. Приміщення має наступні геометричні розміри: довжина – 13,5 м, ширина – 10,5 м, висота – 7,5 м. Ширина головного проходу складає 3,5 м, а вільна зона перед піччю 2,5 м, що відповідає нормам для ливарних цехів згідно з НПАОП 27.5-1.46-14 [35]. Приміщення в якому працює троє осіб, має загальну площу – 141,75 м², а об'єм – 1063,13 м³. Схематичне зображення приміщення виробничого цеху продемонстровано на рисунку 5.1.



1 – індукційна ливарна установка; 2 – бак з водою; 3 – піч опорна лабораторна; 4 – контрольний стіл

Рисунок 5.1 – Схема приміщення в якому проводилось НДР

5.3 Аналіз мікроклімату в робочій зоні приміщення

Для аналізу мікроклімату в робочій зоні приміщення використовується комплекс факторів, які регламентуються державними санітарними нормами України. До таких факторів відносять:

- сезонність;
- температура повітря;
- інтенсивність теплового випромінювання;
- відносна вологість повітря;
- швидкість руху повітря.

За фізичним навантаженням робота в приміщенні виробничого цеху належить до категорії Пб – роботи, що виконуються стоячи, пов'язані з ходінням, переміщенням невеликих (до 10 кг) вантажів та супроводжуються помірним фізичним напруженням. Ця категорія відноситься до фізичних робіт середньої важкості, при яких витрата енергії приблизно дорівнює 240 Ккал/год [36]. Результати вимірювань параметрів мікроклімату наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Значення параметрів мікроклімату

Категорія робіт	Параметр мікроклімату	Період року	Нормовані значення		Дані вимір.	Висновок
			Оптимальне	Допустиме		
Середньої важкості, Пб	Температура повітря, °C	Теплий	20 - 22	15 - 27	19	Допустимо
		Холодний	17 - 19	13 - 21	15	Допустимо
	Відносна вологість повітря, %	Теплий	60 - 40	70	56	Оптимально
		Холодний	60 - 40	75	47	Оптимально
	Швидкість руху повітря, м/с	Теплий	0,3	0,5-0,2	0,23	Оптимально
		Холодний	0,2	≤ 0,4	0,9	Допустимо

Порівняння отриманих даних вимірювань з нормативними значеннями, підтверджує те, що мікроклімат приміщення відповідає вимогам санітарних норм ДСН 3.3.6.042-99 [36].

5.4 Аналіз освітленості приміщення

Правильно сплановане освітлення у виробничому цеху – це ключовий елемент безпеки праці. Погані умови виснажують зір плавильника: низький рівень світла, відблиски від розплавленого металу або мерехтіння ламп знижують концентрацію та підвищують ризик травм під час роботи з гарячим обладнанням [37]. Освітлення поділяється на три види: природне, штучне та суміщене.

У приміщенні виробничого цеху, де проводились дослідження реалізована схема суміщеного освітлення. Через невеликі розміри приміщення, присутнє природнє освітлення у вигляді одного бічного вікна. Для компенсації нестачі денного світла в приміщенні встановлено штучне освітлення у вигляді світлодіодних світильників промислового призначення.

Для того, щоб під час аварійного вимкнення основної електромережі, зони плавильної печі та заливальних майданчиків в приміщенні, оснащені аварійним освітленням. Освітлення приміщення відпловідає встановленим нормам ДБН В.2.5-28:2018 [38].

5.5 Небезпечні чинники при роботі із індукційною установкою

Для проведення дослідження, а саме виплавка лігатур, використовувалась лабораторна індукційна піч потужністю 15 кВт та частотою 20 кГц. Експлуатація тигельної індукційної печі, що працює під надлишковим тиском у захисній атмосфері аргону без використання вакууму, неминуче пов'язана з появою низки специфічних ризиків для здоров'я та життя. Цей технологічний

процес генерує комплекс небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких визначальними є термічні, хімічні, електричні та електромагнітні чинники.

Оскільки індукційна установка є потужним споживачем електроенергії та живиться від трифазної мережі з напругою 380 В, чинник електробезпеки стає критичним. Щоб забезпечити безпеку стосовно електрики, установка підключена до заземлювального проводу з опором не більше 4 Ом згідно з вимогами НПАОП 40.1-1.21-98 [39], а зони обслуговування вистилаються діелектричними гумовими килимками.

Для печей очевидною загрозою є висока температура розплавленого металу, яка в умовах плавки мідних сплавів перевищує тисячу градусів. Прямий контакт оператора з рідким металом або розігрітими елементами конструкції печі призводить до глибоких термічних опіків, а відкрите дзеркало розплаву під час його зливу стає джерелом потужного інфрачервоного випромінювання. Згідно з державними санітарними нормами ДСН 3.3.6.042-99 [36], тривалий вплив такого теплового потоку, що перевищує допустимі норми, небезпечний перегріванням організму аж до теплового удару, а також поступовим ураженням кришталика ока з розвитком професійної катаракти. Після закінчення встановленого циклу нагрівання піч автоматично або вручну вимикається та охолоджується природнім шляхом це найбільш безпечний і рекомендований метод охолодження.

Процес індукційної плавки мідних сплавів у середовищі аргону може супроводжуватись виділенням та накопиченням шкідливих речовин у повітрі, а саме: оксиди металів, металевий пил та діоксид вуглецю. Саме тому, важливо забезпечити вентиляцію, щоб запобігти накопиченню до небезпечних рівнів та забезпечити безпеку працівників. Використання відповідних систем фільтрації і вентиляції може допомогти зменшити ризики, пов'язані з цими шкідливими речовинами [40]. Для того, щоб мінімізувати накопичення шкідливих речовин у повітрі, над індукційною установкою, встановлено пристінну витяжна парасоля типу ЗВП, виробництва «Вентс», Україна, виготовленої зі корозійностійкої сталі (рис. 5.2).

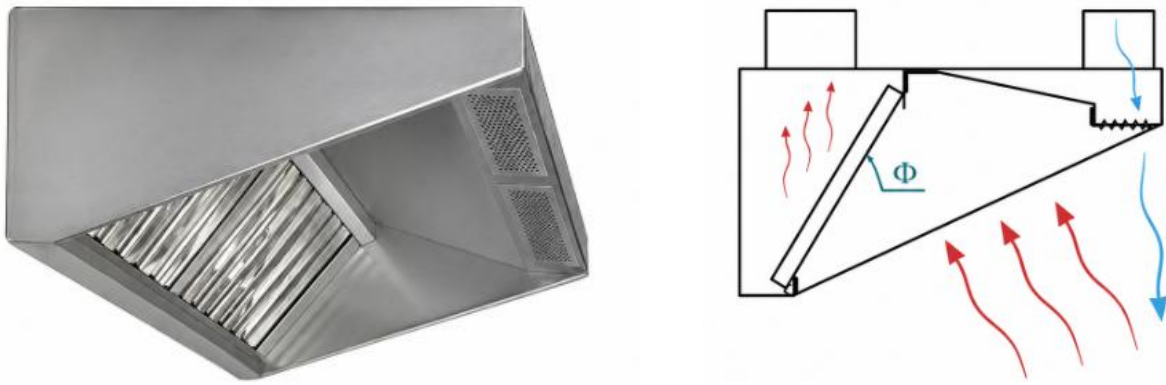


Рисунок 5.2 – Зовнішній вигляд та схема вентиляції типу ЗВП [41]

Продуктивність такої вентиляційної системи розраховують за формулою:

$$L = n \cdot V,$$

де n – кратність повітрообміну, 1/год;

V – об'єм приміщення, м^3 .

Відповідно до нормативних вимог ДБН В.2.5-67:2013 для приміщень лабораторно-термічних ділянок із підвищеним тепловиділенням приймаємо кратність повітрообміну $n = 10 \text{ год}^{-1}$.

Тоді, продуктивність вентиляційної системи становить:

$$L = 10 \cdot 1063,13 = 10631,3 \text{ м}^3/\text{год}.$$

5.6 Аналіз впливу шуму та вібрації

Шум – це сукупність звуків різноманітної частоти та інтенсивності, що виникають в результаті ковалентного руху частинок у пружному середовищі. Шум, який не в межах норми, може спричиняти зниження слухової чутливості.

Основним джерелом шуму у приміщенні є витяжна вентиляція, для відведення газів від печей. Основним принципом зниження акустичного тиску на робочих місцях є локалізація та ліквідація шуму безпосередньо в джерелі його утворення. Це досягається шляхом заміни застарілих технологій і

обладнання на сучасні малOSHумні аналоги, використання методів звукоізоляції, звуковбирання та екранування шкідливих зон. Окрім вентиляцій, шум спричиняють шліфувальні та полірувальні круги.

Принцип встановлення певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних видів регламентуються ДСН 3.3.6.037-99 [41].

Вібрація – це механічні коливання пружних тіл або коливальні рухи механічних систем. Для людини вібрація є видом механічного впливу, який має негативні наслідки для організму [42]. Джерелом вібрації слугує шліфувальна установка. З ціллю знизити шкідливий вплив на організм людини, дана установка розміщена в окремому приміщенні.

5.7 Електробезпека

Живлення промислового обладнання ділянки здійснюється від трифазної електромережі з номінальною напругою 380 В. Плавильний цех за класифікацією належить до категорій приміщень з особливою небезпекою.

Відповідно до вимог офіційного видання «ПУЕ. Правила улаштування електроустановок» [43], безпечна експлуатація індукційного устаткування забезпечується комплексом захисних заходів:

- регулярним інструментальним контролем ізоляції силових кабелів;
- блокуванням доступу до струмоведучих елементів котушки індуктора;
- надійним підключенням усіх металевих корпусів до внутрішнього заземлювального контуру з опором не більше 4 Ом.

В умовах гарячого цеху, де опір шкіри знижується через потовиділення, струм силою понад 25 мА є небезпечним через виникнення судорог м'язів, що унеможливорює самостійне звільнення від джерела напруги, а значення 100 мА і більше призводить до летального наслідку.

З метою мінімізації цих ризиків у цеху виконано захисне заземлення корпусів печі, а робочі місця сплановані так, щоб унеможливити одночасний дотик людини до електрообладнання та заземлених металоконструкцій.

Оскільки аварійні загрози виникають при механічному пошкодженні ізоляції або внаслідок прогару футеровки тигля розплавом, критично важливими є впровадження пристроїв захисного відключення, безперервний моніторинг цілісності тигля та суворе дотримання правил експлуатації електроустановок.

5.8 Засоби індивідуального захисту

У випадках, коли дію небезпечних та шкідливих виробничих факторів не вдається повністю обмежити за допомогою загальнотехнічних рішень, обов'язковим є застосування комплексу засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Відповідно до вимог ДСТУ 7239:2011, усі ЗІЗ, що видаються персоналу, повинні відповідати специфіці конкретного робочого місця, забезпечувати належний рівень безпеки та запобігати професійним ураженням [37].

Згідно з класифікаційними групами зазначеного стандарту, для захисту тіла плавильника від високих температур, бризок розплавленого металу та теплового опромінення передбачено обов'язкове використання спецодягу, що належить до класу захисту від термічних чинників, а саме:

- суконний або спеціальний костюм із вогнестійким просоченням;
- термостійке взуття;
- захисні рукавиці, виготовленими зі щільного брезенту чи термостійкого матеріалу;
- окуляри зі спеціальними затемненими світлофільтрами.

Відповідно до ДСТУ 7239:2011, вагоме значення має також захист органів слуху та дихання в умовах тривалого впливу тонального шуму від витяжної вентиляції та аерозолів конденсації. З цією метою працівники

забезпечуються протишумними навушниками або вкладишами (берушами), а при завантаженні та плавці використовуються протипилові респіратори.

Постійний контроль за справністю, регулярним чищенням та своєчасною заміною ЗІЗ є базовою умовою для мінімізації виробничих ризиків і гарантування безпеки праці відповідно до національних стандартів України.

5.9 Пожежна безпека

Відповідно до вимог ДБН В.2.5-56:2014, приміщення плавильного цеху за вибухопожежною небезпекою належить до категорії [38].

У випадку виникнення пожежі на ділянці може горіти електроустаткування індукційної установки, силова проводка та ізоляція кабелів у каналах. Виникнення пожеж у плавильному цеху можливо за такими основними причинами, як порушення технологічного режиму плавки, несправність високочастотного електроустаткування печі, прогар футеровки тигля розплавом, незадовільний стан ізоляції комунікацій, а також неправильне або необережне користування індукційним обладнанням.

У разі початку пожежі або займання в цеху категорично заборонено використовувати воду, оскільки її потрапляння на дзеркало розплаву металу з температурою понад 1100 °С призведе до миттєвого вибуху. Для безпечного гасіння безпосередньо в приміщенні передбачено первинні засоби пожежогасіння, а саме порошкові вогнегасники типу ВП, які дозволяють ліквідовувати вогнища на електроустановках під напругою, а поруч із виходом розміщено контейнер із сухим просіяним піском та азбестові покривала. Приміщення цеху обладнане автоматичною пожежною сигналізацією із комбінованими оптичними сповіщувачами диму та полум'я, яка при спрацюванні автоматично запускає систему світлозвукового оповіщення людей і блокує подачу живлення на піч. Також на видному місці розміщено план евакуації персоналу (рис. 5.2).

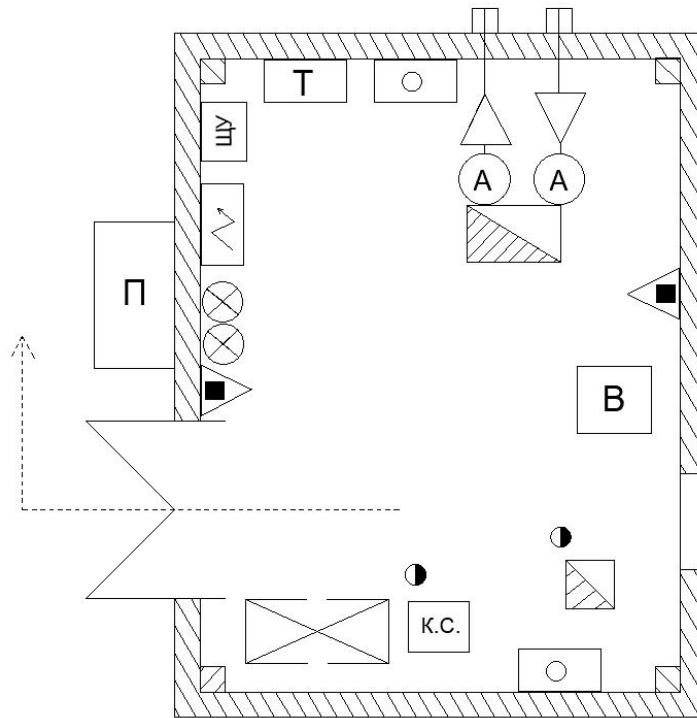


Рисунок 5.2 – План евакуації під час пожежі

5.10 Висновки до розділу 5

Було проведено аналіз параметрів робочого приміщення, а саме: параметрів приміщення, мікроклімату, освітленості, шуму, вібрації, електричної, пожежної безпеки та розглянуто небезпечні чинники при роботі з індукційною плавильною піччю. Все зафіксоване знаходиться в межах допустимих норм.

Встановлено, що при дотриманні встановлених санітарних норм в технологічних приміщеннях проведення НДР не порушує правил та заходів щодо охорони праці.

ВИСНОВКИ

1. В роботі розглянуто нові та перспективні сплави на основі міді, мікролеговані хромом, цирконієм та ванадієм, які здатні зберігати високі показники міцності при підвищених температурах і володіють показниками електропровідності на рівні чистої міді.

2. Проведено експериментальні плавки і досліджено технологічні особливості виплавки та закономірності формування структури і фазового складу мідних сплавів, легованих хромом, цирконієм і ванадієм, а також оцінено вплив комплексного легування на їх структурний стан та рівень зміцнення.

3. Встановлено, що фактичний хімічний склад отриманих сплавів відрізняється від розрахункового, що пов'язано з обмеженою розчинністю легуючих елементів у мідному розплаві та особливостями їх кристалізації. При цьому цирконій і хром характеризуються достатньо високою розчинністю у міді, тоді як поведінка ванадію визначається складнішими процесами фазових перетворень і суттєво залежить від температурних умов.

4. Встановлено, що у процесі охолодження ванадій характеризується схильністю до виділення з пересиченого розплаву внаслідок перитектичних і монотектичних перетворень, унаслідок чого його вміст у мідній матриці стабілізується на рівні близько (0,22–0,3) мас.%.

5. Не підтверджено припущення щодо синергетичного впливу одночасного введення Cr, Zr та V на підвищення взаємної розчинності компонентів у розплаві. Для багатоконпонентної системи встановлено зниження розчинності окремих елементів.

6. Встановлено, що введення легуючих компонентів впливає на залишковий вміст бору в сплавах. Імовірною причиною є взаємодія бору з киснем, який надходить у систему разом із більш активними до окиснення елементами.

7. Металографічними дослідженнями встановлено суттєвий вплив складу сплаву на механізм кристалізації та морфологію структурних складових: для сплаву Cu-Cr характерним є формування дрібнозернистої стовпчастої структури з рівномірно розподіленими включеннями другої фази; у сплаві Cu-V спостерігається формування стовпчастої структури з локальними неоднорідностями, що може бути пов'язано з особливостями розчинення та повторного виділення ванадію; для системи Cu-Zr встановлено формування дендритної структури, характерної для сплавів, близьких до евтектичних концентрацій; Встановлено, що комплексне легування Cu-Cr-V-Zr сприяє формуванню більш дрібної рівновісної структури з дисперсними структурними складовими, що свідчить про суттєве модифікування структури.

8. Показано, що всі досліджені леговані сплави характеризуються суттєвим в (2,5–3,5) рази підвищенням мікротвердості порівняно з чистою міддю внаслідок реалізації механізмів твердорозчинного, дисперсійного та зернограничного зміцнення.

9. Встановлено, що відпал досліджуваного чотирьохкомпонентного мідного сплаву частково усуває дендритну морфологію зерен, а також ініціює зміни фазового складу порівняно із литим станом: формуються частинки $(Cr,V)_2Zr$ на межах зерен та метастабільна фаза Cu_8Zr_3 на потрійних межах зерен. Це пояснюється активним перерозподілом цирконію з інтерметалідної складової та його взаємодією з хромом та ванадієм.

10. Проведення процесу гартування при 920 °C чотирьохкомпонентного досліджуваного мідного сплаву, дозволив розчинити приблизно 1 мас.% легуючих елементів в твердому розчині на основі міді. При цьому відмічається нерозчинність фаз $(Cr,V)_2Zr$ розміром (1–2) мкм, що вказує на їх високу термічну стабільність.

11. Встановлено, що процес старіння після гартування досліджуваного сплаву Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V має різний ефект залежно від температури: при 320 °C досягається високий рівень мікротвердості матриці та меж зерен (179–182) HV за рахунок рівномірного виділення дисперсних зміцнюючих фаз

(Cr,V)₂Zr, частинки хрому з розчиненим в ньому ванадієм, тоді як підвищення температури до 580 °C сприяє максимального зміцнення матриці (196 HV) при одночасному зниженні мікротвердості меж зерен до 163 HV внаслідок коагуляції інтерметалідів, що підвищує ризик схильності матеріалу до крихкого та зернограничного руйнування.

12. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення нових високоміцних мідних сплавів із підвищеним рівнем експлуатаційних властивостей та оптимізації технологій їх одержання.

13. Проведено техніко-економічний аналіз, який підтвердив доцільність виконання науково-дослідної роботи та перспективність її практичного впровадження. Встановлені показники економічної ефективності демонструють високу результативність запропонованих технічних рішень. Отримані дані свідчать, що реалізація розробленої технології забезпечує раціональне використання ресурсів, зниження витрат на обробку матеріалів та покращення виробничих характеристик.

14. Комплексний аналіз умов проведення експериментальних досліджень засвідчив їхню відповідність чинним законодавчим та гігієнічним нормам. Організація робочого середовища у приміщенні ливарного цеху відповідає встановленим критеріям щодо площі, об'єму та мікроклімату. Аналіз освітлення, а також рівні шуму й вібрації підтверджує належний рівень безпеки та відповідність вимогам для здійснення наукових досліджень.

CONCLUSIONS

1. The paper considers new and promising copper-based alloys micro-alloyed with chromium, zirconium and vanadium, which are capable of maintaining high strength at elevated temperatures and have electrical conductivity indicators at the level of pure copper.

2. Experimental melting were carried out and the technological features of smelting and the regularities of the formation of the structure and phase composition of copper alloys alloyed with chromium, zirconium and vanadium were investigated, and the effect of complex alloying on their structural state and level of strengthening was also assessed.

3. It was established that the actual chemical composition of the obtained alloys differs from the calculated one, which is associated with the limited solubility of alloying elements in the copper melt and the peculiarities of their crystallization. At the same time, zirconium and chromium are characterized by a sufficiently high solubility in copper, while the behavior of vanadium is determined by more complex processes of phase transformations and significantly depends on temperature conditions.

4. It was established that during the cooling process, vanadium is characterized by a tendency to separate from the supersaturated melt due to peritectic and monotectic transformations, as a result of which its content in the copper matrix stabilizes at a level of about (0,22–0,3) wt%.

5. The assumption regarding the synergistic effect of the simultaneous introduction of Cr, Zr and V on increasing the mutual solubility of the components in the melt was not confirmed. For a multi-component system, a decrease in the solubility of individual elements was established.

6. It was established that the introduction of alloying components affects the residual content of boron in alloys. The probable reason is the interaction of boron with oxygen, which enters the system together with elements more active for oxidation.

7. Metallographic studies have established a significant influence of the alloy composition on the crystallization mechanism and morphology of structural components: the Cu-Cr alloy is characterized by the formation of a fine-grained columnar structure with evenly distributed inclusions of the second phase; in the Cu-V alloy, the formation of a columnar structure with local inhomogeneities is observed, which may be associated with the peculiarities of dissolution and re-separation of vanadium; for the Cu-Zr system, the formation of a dendrite structure characteristic of alloys close to eutectic concentrations has been established; It has been established that complex alloying of Cu-Cr-V-Zr contributes to the formation of a finer equilibrium structure with dispersed structural components, which indicates a significant modification of the structure.

8. It has been shown that all the studied alloyed alloys are characterized by a significant (2,5–3,5) times increase in micro-hardness compared to pure copper due to the implementation of solid-solution, dispersion and grain boundary strengthening mechanisms.

9. It was found that annealing of the studied four-component copper alloy partially eliminates the dendritic morphology of grains, and also initiates changes in the phase composition compared to the cast state: $(\text{Cr,V})_2\text{Zr}$ particles are formed at the grain boundaries and the metastable Cu_8Zr_3 phase at the ternary grain boundaries. This is explained by the active redistribution of zirconium from the intermetallic component and its interaction with chromium and vanadium.

10. Carrying out the quenching process at 920 °C of the four-component studied copper alloy allowed to dissolve approximately 1 wt.% of alloying elements in a solid solution based on copper. At the same time, the insolubility of $(\text{Cr,V})_2\text{Zr}$ phases with a size of (1–2) μm is noted, which indicates their high thermal stability.

11. It was established that the aging process after quenching of the studied alloy Cu-0,65Cr-0,5Zr-0,22V has a different effect depending on the temperature: at 320 °C, a high level of microhardness of the matrix and grain boundaries (179–182) HV is achieved due to the uniform separation of dispersed strengthening phases $(\text{Cr,V})_2\text{Zr}$, chromium particles with vanadium dissolved in it, while increasing

the temperature to 580 °C contributes to the maximum strengthening of the matrix (196 HV) with a simultaneous decrease in the microhardness of grain boundaries to 163 HV due to the coagulation of intermetallics, which increases the risk of the material's susceptibility to brittle and grain boundary fracture.

12. The results obtained can be used in the development of new high-strength copper alloys with increased performance properties and optimization of their production technologies.

13. A technical and economic analysis was carried out, which confirmed the feasibility of carrying out scientific and research work and the prospects for its practical implementation. The established indicators of economic efficiency demonstrate the high effectiveness of the proposed technical solutions. The data obtained indicate that the implementation of the developed technology ensures the rational use of resources, reduces the cost of material processing and improves production characteristics.

14. A comprehensive analysis of the conditions for conducting experimental research has shown their compliance with current legislative and hygienic standards. The organization of the working environment in the foundry premises meets the established criteria for area, volume and microclimate. Analysis of lighting, as well as noise and vibration levels confirms the appropriate level of safety and compliance with the requirements for conducting scientific research.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 2025.10 The World Copper Factbook [Електронний ресурс] // International Copper Study Group. – Режим доступу: <https://icsg.org/download/2025-10-the-world-copper-factbook/?ind=68ece711240a5&filename=Factbook2025.pdf&wpdmdl=8908&refresh=68ece7507eb111760356176>. (дата звернення: 21.04.2026). – Назва з екрана.
2. Кириленко К. В. Електротехнічні матеріали : курс лекцій / Катерина Всеволодівна Кириленко, Всеволод Михайлович Кириленко, Володимир Михайлович Головка. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 109 с.
3. Кондрашев П.В. Матеріалознавство : курс лекцій. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 98 с.
4. Alloying: Understanding the Basics [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.aub.9781627082976>. (дата звернення: 21.04.2026). – Назва з екрана.
5. Low-temperature powder X-ray diffraction measurements in vacuum: analysis of the thermal displacement of copper [Електронний ресурс] / Nanna Wahlberg [та ін.] // Journal of Applied Crystallography. – 2016. – Vol. 49. – P. 110–119. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1107/S1600576715022621>. (дата звернення: 22.04.2026). – Назва з екрана.
6. Ліхацький Р. Структура виливків з литих композитів системи Cu-V, отриманих методом електронно-променевого лиття [Електронний ресурс] / Р. Ліхацький, Є. Матвієць // Науково-технічний журнал "Металознавство та обробка металів". – 2023. – Т. 29, № 3. – С. 56–67. – Режим доступу: <https://doi.org/10.15407/mom2023.03.056>. (дата звернення: 22.04.2026). – Назва з екрана.
7. Bhargava A. K. 2.14 Heat-Treating Copper and Nickel Alloys [Електронний ресурс] / A. K. Bhargava, M. K. Banerjee // ed. by M. Hashmi. –

Oxford, 2017. – P. 398–420. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09196-7>. (дата звернення: 22.04.2026). – Назва з екрана.

8. 17 - Radiating properties of metals [Електронний ресурс] // ed.by E. A. Brandes, G. B. Brook. – Oxford, 1992. – P. 17-1–17-12. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051730-8.50022-4>. (дата звернення: 24.04.2026). – Назва з екрана.

9. Cu-V [Електронний ресурс] // CompuTherm. – Режим доступу: <https://compuTherm.com/cu-v>. (дата звернення: 24.04.2026). – Назва з екрана.

10. Arias D. The Cr–Zr (Chromium-Zirconium) system [Електронний ресурс] / D. Arias, J. P. Abriata // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. – 1986. – Vol. 7, № 3. – P. 237–244. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1007/BF02868997>. (дата звернення: 24.04.2026). – Назва з екрана.

11. Lemaignan C. Zirconium Alloys in Nuclear Applications [Електронний ресурс] / Clément Lemaignan, Arthur T. Motta // Materials Science and Technology. – [S. I.], 2006. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1002/9783527603978.mst0111>. (дата звернення: 25.04.2026). – Назва з екрана.

12. Ghosh G. Thermodynamic and kinetic modeling of the Cr-Ti-V system/ Gautam Ghosh // Journal of phase equilibria. – 2002. – Vol. 23. – P. 310–328.

13. Okamoto H. Supplemental Literature Review of Binary Phase Diagrams: Ag-Li, Ag-Sn, Be-Pu, C-Mn, C-Si, Ca-Li, Cd-Pu, Cr-Ti, Cr-V, Cu-Li, La-Sc, and Li-Sc / H. Okamoto // Journal of phase equilibria and diffusion. – 2017. – Vol. 38, № 1. – P. 70–81.

14. The phase equilibria of the Cu–Zr–V system supported by experiments and CALPHAD method / Jing Xie [et al.] // Intermetallics. – 2025. – Vol. 186. – P. 108937.

15. Мідь і її сплави. (2022). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ni.biz.ua/1/1_10/1_109947_med-i-ee-splavi.html. (дата звернення: 30.04.2026). – Назва з екрана.

16. Металознавство / О. Бялік [та ін.]. – 2-ге вид. – Київ : ІВЦ "Політехніка", 2002. – 84 с.

17. Kintek Furnace. What Is The Historical Background Of Induction Furnace Development? From Faraday To Modern Metallurgy [Електронний ресурс] / Kintek Furnace // Home - Kintek Furnace. – Режим доступу: <https://kintekfurnace.com/faqs/what-is-the-historical-background-of-induction-furnace-development>. (дата звернення: 30.04.2026).– Назва з екрана.

18. Хричиков В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів : навч. посіб. / В. Хричиков, О. Меньяло. – 2-ге вид. – Дніпропетровськ : НМетАУ, 2015. – 89 с.

19. Козлов Г. Конструкція електрометалургійних агрегатів : підручник / Г. Козлов, В. Тополов. – Нікополь : ВСП НФК УДУНТ, 2023. – 246 с.

20. Ардаб'єва В. О. Індукційні плавильні печі: види, технологічні особливості та перспективи розвитку : кваліфікаційна робота бакалавра спеціальності 136 «Металургія» / наук. керівник О. С. Воденнікова. – Запоріжжя : ЗНУ, 2024. – 65 с.

21. Козич М. Термічна обробка металів : конспект лекцій / Марина Козич. – Дніпро : МОН України ВИЩЕ ПРОФ. УЧИЛИЩЕ №17 м, 2024. – 48 с.

22. Класифікація видів термічної обробки за О. Бочваром [Електронний ресурс] // StudFiles. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/5200977/page:7/>. (дата звернення: 01.05.2026) – Назва з екрана.

23. Вплив термічної обробки на електропровідність металів – КАРБАЗ, ТОВ [Електронний ресурс] // КАРБАЗ, ТОВ - всі види термічної обробки. – Режим доступу: <https://karbaz.com.ua/uk/statti-ta-publikaci/vpliv-termichnoi-obrobki-na-elektroprovidnist-metaliv/>. (дата звернення: 04.05.2026) – Назва з екрана.

24. Muffle furnace СНОЛ-7,2/1100 [Електронний ресурс] // TermoPro® TermoLab® - LLC Thermoengineering - thermal equipment. – Режим доступу: <https://termo.in.ua/en/product/snol-7-2-1100> . (дата звернення: 04.05.2026) – Назва з екрана.

25. Калініна Т. „Макроаналіз,, з дисципліни «Матеріалознавство» для студентів напряму «Ливарне виробництво» : Метод. вказівки до виконання

лаборатор. роботи / Т. Калініна, О. Буря. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2015. – 18 с.

26. Лабораторна робота № 2 Мікроструктурний метод дослідження металів [Електронний ресурс] // StudFiles. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/8346620/> (дата звернення: 05.05.2026). – Назва з екрана.

27. Навчально-наукова лабораторія електронної та оптичної мікроскопії [Електронний ресурс] // Головна. – Режим доступу: <https://imz.kpi.ua/uk/nauka/pidsumky-naukovoi-roboty-nn-imz-im-yeo-patona/32-katehoriia-uk-ua/nauka/595-navchalno-naukova-laboratoriya-elektronnoji-ta-optichnoji-mikroskopiji.html>. (дата звернення: 05.05.2026). – Назва з екрана.

28. Беліков К. Рентгенофлуоресцентний аналіз : навч. посіб. / К. Беліков, О. Юрченко. – Харків : ХАРКІВ. НАЦ. УН-Т ім. В.Н. КАРАЗІНА, 2012. – 52 с.

29. Copper, Cu; Annealed // MatWeb: Material Property Data [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=9aebe83845c04c1db5126fada6f76f7e. (дата звернення: 06.05.2026). – Назва з екрана.

30. Microstructure and Properties of Fine Grained Cu-Cr-Zr Alloys after Thermo-Mechanical Treatments / A. M. R. de Oliveira, A. M. Jorge, S. T. Amancio-Filho et al. // Materialia. – 2018.

31. The Aging and Recrystallization in Cu-Cr, Cu-Zr, and Cu-Cr-Zr Alloys / I. V. Zueva, V. V. Rybin, E. A. Nesterova, N. V. Ryzhkina // The Physics of Metals and Metallography. – 2019

32. Козик В. В. Економіка підприємства: підручник / Козик В. В., Ємельянов О. Ю., Загорецька О. Я. – Львів: Видавництво «Новий Світ – 2000», 2025 – 278 с.

33. Волкова І. Калькуляція собівартості продукції, робіт та послуг: підручник / Волкова І., Оксанич О., Миронова О. – Київ: Центр учбової літератури, 2023 – 326 с.

34. Про охорону праці [Електронний ресурс] : Закон України від 14.10.1992 № 2694-XII : станом на 12 верес. 2025 р. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text> (дата звернення: 12.05.2026). – Назва з екрана.

35. НПАОП 27.5-1.46-14. Правила охорони праці у ливарному виробництві. – Чинний від 2014-12-12. – Вид. офіц. – Київ : реєстрація та публ. Мін'юст України, 2014. – 104 с.

36. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – Чинний від 1999-12-01. – Вид. офіц. – Київ : ГОЛОВ. ДЕРЖ. САНІТАР. ЛІКАР УКРАЇНИ, 1999. – 18 с.

37. Левченко О.Г. Охорона праці та цивільний захист: навч. посіб. для студ. спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / О.Г. Левченко // КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 337 с.

38. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. – На заміну ДБН В.2.5-28-2006; чинний від 2019-03-01. – Вид. офіц. – Київ : НДІБК, 2018. – 137 с.

39. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98). Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – На заміну ДНАОП 0.00-1.21-84 ; чинний від 1998-02-20. – Вид. офіц. – Київ : Держ. ком. України з нагляду за охорон. пр., 1998. – 176 с.

40. Наказ МОЗ України № 1596. Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони. – На заміну Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони, затверджені наказом МОЗ України від 13.10.2017 № 1257 ; чинний від 2020-09-04. – Вид. офіц. – Київ : МОЗ України, 2020. – 64 с.

41. Парасолі витяжні та припливно-витяжні з нержавіючої сталі [Електронний ресурс] // SOLVI. – Режим доступу: <https://solvi.com.ua/produkcija-uk/parasoli-vitjazhni-ta-priplivno-vitjazhni-z-nerzhavijuchoi-stali/> (дата звернення: 13.06.2026). – Назва з екрана.

42. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – Чинний від 1999-12-01. – Вид. офіц. – Київ : МОЗ, 1999. – 39 с.

43. Гігієнічне нормування та заходи і засоби захисту від вібрації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cpo.stu.cn.ua/Oksana/posibnik/860.html>. (дата звернення: 13.05.2026). – Назва з екрана.

44. ПУЕ:2017. Правила улаштування електроустановок. – На заміну ПУЕ-86 ; чинний від 2017-08-21. – Вид. офіц. – Київ : Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.

45. ДСТУ 7239:2011. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація. – На заміну ГОСТ 12.4.011-89 ; чинний від 2011-08-01. – Вид. офіц. – Київ : Держспоживстандарт України, 2011. – 8 с.