



Механіка матеріалів

Прийнято 17.11.2025. Прорецензовано 20.12.2025. Опубліковано 30.12.2025.

УДК 621

DOI: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-13-23

КОМПЛЕКСНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ АРМОВАНОЇ ЗОНИ КОМПОЗИЦІЙНОГО ОСНАЩЕННЯ БУРОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ

Борушак Л. О. *

Кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15

<http://orcid.org/0000-0002-4090-0279>

e-mail: liubomyr.borushchak@nung.edu.ua

Романів М. Р.

Магістр

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

76019, Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15

<https://orcid.org/0009-0001-1784-7342>

e-mail: mykola.romaniv-pmkm251@nung.edu.ua

Анотація. У статті проаналізовано сучасні технології отримання композиційних матеріалів на основі методів порошкової металургії, просочування та литва. Матрицею таких композитів є алюмінієві та мідні сплави, а наповнювачем – порошкові матеріали на основі карбідів тугоплавких металів. Обґрунтовано непридатність таких матеріалів до роботи в умовах високих статичних і динамічних навантажень в присутності абразивного середовища. Коротко описано суть технології отримання зносостійкого об'ємно-армованого оснащення бурових інструментів та основні вимоги до їх працездатності. Розглядаються результати комплексних досліджень макро-, мікроструктури, мікротвердості та зносостійкості в аспекті забезпечення експлуатаційних характеристик армованої зони композиційного оснащення бурового породоруйнуючого та аварійного інструменту. Встановлено характер розподілу зерен твердих сплавів у об'ємі армованої зони. Виявлено основні дефекти армованих виливків – раковини та порожнини, як наслідок виділення газів та нерівномірної кристалізації основного металу у виливку. Шляхом виготовлення мікрошліфів, їх травлення та вивчення на металографічному обладнанні виявлено мікроструктури металозв'язки армованої зони. Визначено мікротвердості металозв'язки, перехідної зони та армуючих компонентів методами вколювання та дряпання. Зазначено, що значну роль у забезпеченні абразивної та ударно-абразивної стійкості інструменту відіграють як відсотковий вміст армуючих зерен, їх розподіл та концентрація в об'ємі армованої зони, так і ступінь розчинення армуючих компонентів у металозв'язці, в першу чергу вольфраму, титану нікелю та кобальту. Як наслідок, навколо зерен твердого сплаву утворюється перехідна зона, що забезпечує міцність і в'язкість їх утримання в

Запропоноване посилання: Борушак, Л. О. & Романів, М. Р. (2025). Комплексні дослідження властивостей армованої зони композиційного оснащення бурових інструментів. Науковий вісник ІФНТУНГ, 2(59), 13-23. doi: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-13-23

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

основному металі. Результати випробувань армованих зразків на стійкість до абразивного спрацювання виявляють вплив концентрації зерен армуючих компонентів на їхню стійкість.

Ключові слова: оснащення бурового інструменту, об'ємно-армована зона, зернистий твердий сплав, металозв'язка, макроструктура, мікроструктура, евтектика, карбіди, мікротвердість, ударно-абразивна стійкість.

Вступ

Інтенсивний та економічно ефективний видобуток нафти і газу, а також проведення аварійно-відновлювальних робіт при бурінні, неможливі без застосування прогресивних конструкцій породоруйнівного та ловильного інструменту. Вказані інструменти зазвичай армуються суцільними твердосплавними, алмазними або імпрегнованими елементами. Зважаючи на високу вартість такого оснащення, актуальним завданням є створення нових композиційних матеріалів з високими експлуатаційними характеристиками за суттєво нижчої собівартості. Традиційні методи порошкової металургії та литва дозволяють виготовляти зносостійкі композити переважно циліндричної або зубчасті конфігурації порівняно невеликих розмірів, що обмежує їх застосування у великогабаритних конструкціях.

Аналіз сучасних досліджень та публікацій

На даний час відомо достатньо багато розробок композиційних матеріалів на основі міді та вольфраму [1, 2, 4], що застосовуються для потужних електричних контактів, титаноматричних композитів з карбідами і боридами титану [1], титан-алюмінієві композити [3] та інші.

У статті [1] описано ливарний спосіб отримання композиційного дисперсно-зміцненого композиційного матеріалу, матрицею якого є сплави міді, а наповнювачем – дисперсні частинки хромистої сталі. Наводяться результати дослідження мікроструктури та триботехнічних характеристик отриманих композитів. Проте, отримані матеріали не здатні працювати в умовах значних ударно-абразивних навантажень, а описаний метод литва не передбачає отримання композиту з наперед заданим розподілом армуючих компонентів в об'ємі матриці. У статті [2] наведено результати дослідження структури та хімічного складу, отриманого спіканням та просочуванням композиційних матеріалів на основі систем W-Ni та W-Fe та легованих міддю. Встановлено високий рівень адгезії між залізом, міддю та вольфрамом. Проте ця технологія не передбачає отримання композитів з перехідними диференційованими властивостями.

У статті [3] описано технологію отримання нульмірного композиційного ливарного сплаву системи (Al-FeCr). Наведено результати досліджень мікроструктури, а також фазового та хімічного складу як самого сплаву, так і його окремих компонентів. Встановлено, що хімічний склад структурних складових композиту не відрізняється від хімічного складу вихідних компонентів. Висловлено припущення про існування адгезійного зв'язку між компонентами. Виведено математичні залежності теплових і адгезійних процесів при отриманні вказаного композиту. У статті [4] представлено шаруватий композиційний матеріал системи VT-6/Al, отриманий за ливарною технологією з просочуванням титанового пакету розплавом алюмінію. Виявлено межі взаємодії компонентів композиту і досліджено механічні властивості. Але описаний матеріал не містить включень, основою яких є карбіди, або ж нітриди важких металів, таких як вольфрам, тантал, що характеризуються значною твердістю і зносостійкістю. В [5] досліджено вплив деформованого стану матеріалу при гарячому штампуванні на структуру та фізико-механічні властивості порошкових композитів системи Fe-Cr-C. У статті [6] описано процес гарячого ізостатичного пресування (HIP) нержавіючих та інструментальних сталевих матриць, армованих Al_2O_3 , TiC, Cr_3C_2 або TiN, а також виявлено фактори, що впливають на розподіл армування, процеси на межі розділу, а також механічні та корозійні властивості. У статті [7] досліджено композитне покриття на основі заліза, армоване WC, що було виготовлено методом прямого енергетичного осадження (DED) на поверхні сталі. Було запропоновано метод оцінки властивості «міцність-в'язкість» композитних покриттів. Результати показали, що покриття з початковим вмістом WC 40 мас.% демонструє оптимальні характеристики міцності-в'язкості. У статті [8] розроблено гібридний підхід до виробництва (адитивний + субтрактивний) для реалізації композитів з металевою матрицею, армованих безперервним волокном. Для нанесення металевої матриці було застосовано DED на основі дрютяної дуги, а потім субтрактивний метод для створення канавок для точного розміщення безперервних волокон для виготовлення кожного шару. У статті [9]

розроблено нову конфігурацію просторового пучка армованого залізоматричного композиту з використанням вольфрамового дроту (W) та карбиду вольфраму (WC). Армування зв'язкою (W) WC/Fe ефективно підвищує міцність та в'язкість композиту завдяки високій об'ємній частці та градієнтному розподілу частинок WC у поєднанні із синергетичним ефектом α -Fe. У статті [10] пористу кераміку TiC було використано як армуючий матеріал для створення взаємопроникних тривимірних (3D) мережевих композитів TiC/45 зі сталі методом інфільтрації розплаву.

Для аналізу механічних властивостей, мікроструктури та хімічного складу зазначених матеріалів було застосовано як класичні методи механічних випробувань і металографії, так і сучасні методи рентгеноспектрального аналізу. Зокрема, значний науковий інтерес становить вивчення мікротвердості структурних складових та динаміки її зміни безпосередньо у компонентах сформованих композитів. Проте встановлено, що такі композити не мають достатньої стійкості в умовах інтенсивних знакозмінних ударних навантажень та за наявності абразивного середовища. Окрім того, чинні технології отримання композитів, як і їхній фазовий склад, не забезпечують досягнення цільового рівня експлуатаційних характеристик.

Висвітлення не вирішених раніше частин загальної проблеми

Для вирішення цієї проблеми були розроблені нові технології отримання металоматричних композиційних матеріалів системи «сталь - зернистий твердий сплав», переважно литий та колотий карбід вольфраму WC (реліт). Такі технології здатні забезпечити комплексні властивості отриманих матеріалів – високу твердість і зносостійкість в умовах ударно-абразивних навантажень у поєднанні з в'язкістю і механічною міцністю.

Суть запропонованих технологій полягає у введенні на стадії литва твердосплавних зерен в заготовки, отримані відцентровим або ж вібраційним методами. При цьому можна застосовувати керамічні, піщано-глинисті та кокільні ливарні форми. Підбираючи технологічні параметри процесу, можна отримати композиційні матеріали системи «сталь-твердий сплав» із прогнозованими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. Останні визначаються відсотковим вмістом, розподілом твердосплавних частинок в об'ємі сталевого виливка та структурою металевої матриці.

Особливістю даного методу є можливість отримання виливків дискової, циліндричної, зубчастої форми з композиційно-армованою зоною різної конфігурації, розмірів та відсотковим вмістом армуючих компонентів.

Слід детальніше зупинитись на властивостях композиційних матеріалів, отриманих за вказаною технологією. Оскільки фізико-механічні властивості основного металу виливка та зернистого наповнювача відрізняються дуже суттєво, то раціональне їх поєднання дає змогу отримати армовані виливки з широким діапазоном фізико-механічних та експлуатаційних параметрів. До них, в першу чергу, відносяться механічна міцність, абразивна та ударно-абразивна стійкість.

Відомо, що перелічені вище властивості безпосередньо визначаються концентрацією твердого сплаву в армованій зоні, його грануляцією, ступенем розчинення зерен твердого сплаву і, відповідно, легуванням його елементами металу матриці. Останній показник першочергово визначає міцність і мікротвердість основного металу.

Відомо також, що впродовж останніх років дослідження виливків, отриманих шляхом армування зернистими твердими сплавами на основі карбідів вольфраму, не проводились.

Метою роботи є дослідження характеристик композиційних виливків: розподілу зерен твердого сплаву в армованому об'ємі (макроструктури), його концентрації, мікроструктури металоматриці та мікротвердості в аспекті впливу перелічених показників на експлуатаційні характеристики армованого оснащення бурових інструментів.

Виявлення макроструктури армованих виливків

Для вивчення макроструктури виконувались поздовжні та поперечні шліфи циліндричних зразків діаметром 23 мм, армованих різними способами та з різними значеннями технологічних параметрів. Шліфи протравлювали 10% розчином нітратної кислоти. Металографічні шліфи готували шляхом механічного шліфування з наступним поліруванням на суспензії оксиду алюмінію Al_2O_3 . Для підготовки зразків використовували обладнання Struers LaboPol-21 та LECO Spectrum System 1000.

У результаті порівняльного аналізу макроструктури досліджуваних зразків встановлено, що армування деталей під час лиття у нерухомі (необертові) форми не забезпечує рівномірного розподілу та високої концентрації зерен твер-

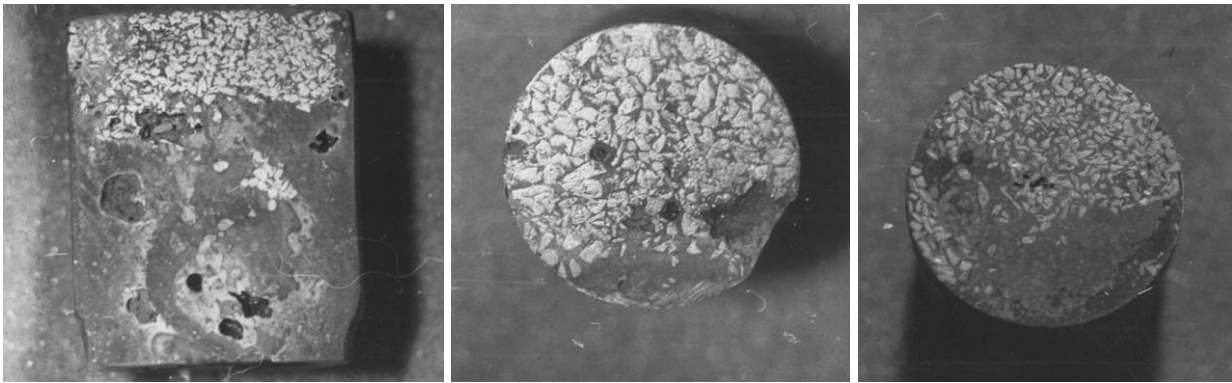


Рисунок 1 – Дефекти макроструктури армованих виливків

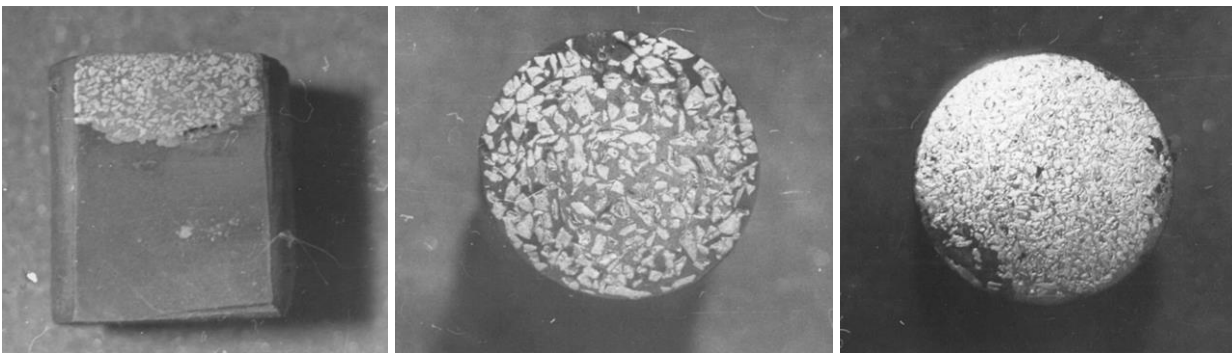


Рисунок 2 – Задовільна макроструктура армованих виливків

дого сплаву в армованому об'ємі (понад 35–40 %) при задовільній структурі основного металу. За такого способу виготовлення виникають характерні ливарні дефекти, зокрема газові раковини та порожнини (рис. 1).

Надання ливарній формі вібраційних коливань з оптимальними значеннями амплітуди і частоти підвищує відсотковий вміст твердого сплаву у нижній частині виливка до 50–55 %, причому розподіл по перерізу більш рівномірний.

Збільшення частоти та амплітуди коливань у 2,5–4,0 рази понад оптимальні значення призводить до появи дефектів, аналогічних тим, що виникають під час армування у нерухомі (необертові) форми.

При армуванні в процесі відцентрового литва вищезгадані дефекти майже повністю усуваються під дією відцентрових сил. Концентрація армуючих частинок зростає до 60–68 %, але має місце нерівномірний розподіл по перерізах армованої зони.

Накладання вібрації, прискорення якої такого ж порядку, як і прискорення відцентрових сил, армована зона зменшується в об'ємі, а концентрація твердого сплаву у ній зростає, причому неармованих периферійних об'ємів металу майже не виявлено (рис. 2).

Окрім способу армування і міри вібраційного впливу якість армованої зони залежить від грануляції зернистого твердого сплаву і температури нагріву ливарної форми. Збільшення розміру зерен з 0,6 – 0,9 до 1,6 – 2,5 мм несуттєво знижує їхню концентрацію (рис. 2) при сталих значеннях інших параметрів. Нагрівання ливарної форми до 650–700°C призводить до майже повного розчинення зерен твердого сплаву в матриці, внаслідок чого утворюється сильно легований метал. Особливо це помітно за відсутності обертання форми, бо переміщення зерен твердого сплаву у периферійні об'єми під дією гравітації відбувається дуже повільно. В умовах вібрації форми «обмивання» зерен твердого сплаву відбувається досить інтенсивно.

Виявлено також, що вібраційний вплив покращує заповнення твердим сплавом кутових периферійних об'ємів форми і тим самим зменшує розмірне спрацювання оснащення у період припрацювання (рис. 2).

Дослідження мікроструктури армованих зразків

Очевидно, що мікроструктура матриці армованої зони суттєво визначає її експлуатаційні показники (абразивну та ударно-абразивну стійкість).

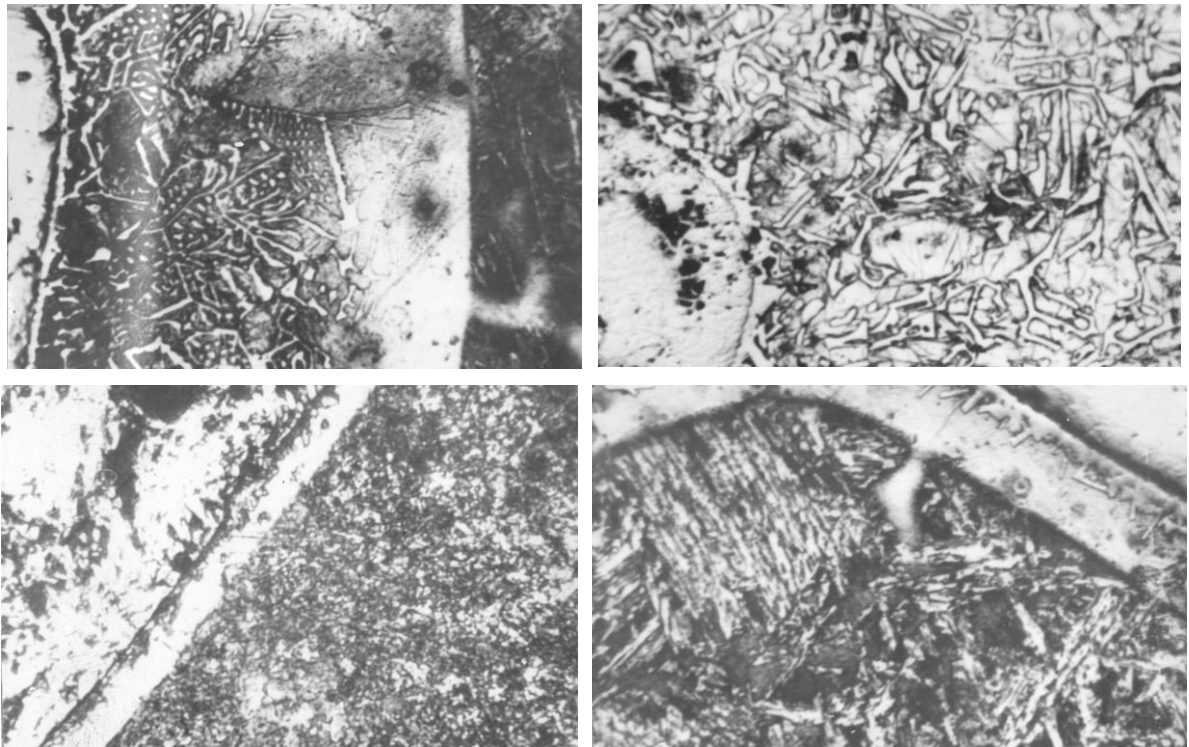


Рисунок 3 – Мікроструктура метало матриці та перехідної зони армованих зразків. 450^x Травлення 2%-ним розчином нітратної кислоти в нашатирному спирті

Дослідження мікроструктури проводились нами на металографічному мікроскопі ММР-2Р, підготовка зразків здійснювалась травленням полірованої поверхні реактивом Муракамі та 2%-ним розчином азотної кислоти в нашатирному спирті.

Встановлено, що головними структурними складовими фазами металозв'язки є α -твердий розчин W в залізі, залізо-вольфрамовий карбід (ζ -фаза), подвійна евтектика $\alpha + \zeta$, а також вольфрамід заліза – ε -фаза, подвійна $\zeta + \theta$ і потрійна $\alpha + \zeta + \theta$ евтектики.

Травленням реактивом Муракамі протягом 5-10 с виявляється карбідна складова α -фази коричневого кольору. α -твердий розчин не протравлюється і залишається світлим.

Розчин HNO_3 протравлює виключно α -твердий розчин, виявляючи його неоднорідність, утворену внаслідок нерівномірності насичення сплаву під час розчинення литого карбиду W.

Якісний стан мікроструктури характеризується кількістю та формою карбідних фазових складових, наявністю раковин, порожнин і тріщин, а також нерівномірністю структури в об'ємі.

Фазовий склад металозв'язки (матриці) залежить як від способу армування, так і від значень технологічних параметрів процесу [2, 3].

Структура матриці армованих зразків, виготовлених методом лиття у нерухомі форми, загалом відповідає 5–8 балам за шкалою ВНДІБТ та характеризується значною неоднорідністю складу в об'ємі (рис. 3).

Характерним для такої структури є як значний розмір включень ζ -фази, особливо навколо зерна WC, так і об'єми α -твердого розчину і нелегованого основного металу (рис. 4).

Механічна міцність утримання зерен у такій матриці незначна з причини наявності тріщин, пор і порівняно великих (70-80 мкм) розмірів зерен матриці (рис. 5).

Такі дефекти спричинені, в основному, нерівномірністю процесів кристалізації виливка, що також сприяє зростанню внутрішніх напружень. З накладанням вібрації у процесі армування зростає рухливість частинок розплаву, який кристалізується, покращується теплопередача і подрібнюється зерно основного металу. Зерна твердого сплаву краще заповнюють нижній об'єм виливка під впливом гравітації. Структура матриці стабілізується до 4-6 балів та зменшується число дефектів порівняно з першим варіантом (рис. 3).

Армування в процесі відцентрового литва забезпечує більш якісну структуру металозв'язки (рис. 4). Так, включення ζ -фази приблизно одного розміру, пластинчасті за формою і рівномірно розподілені в об'ємі між зернами

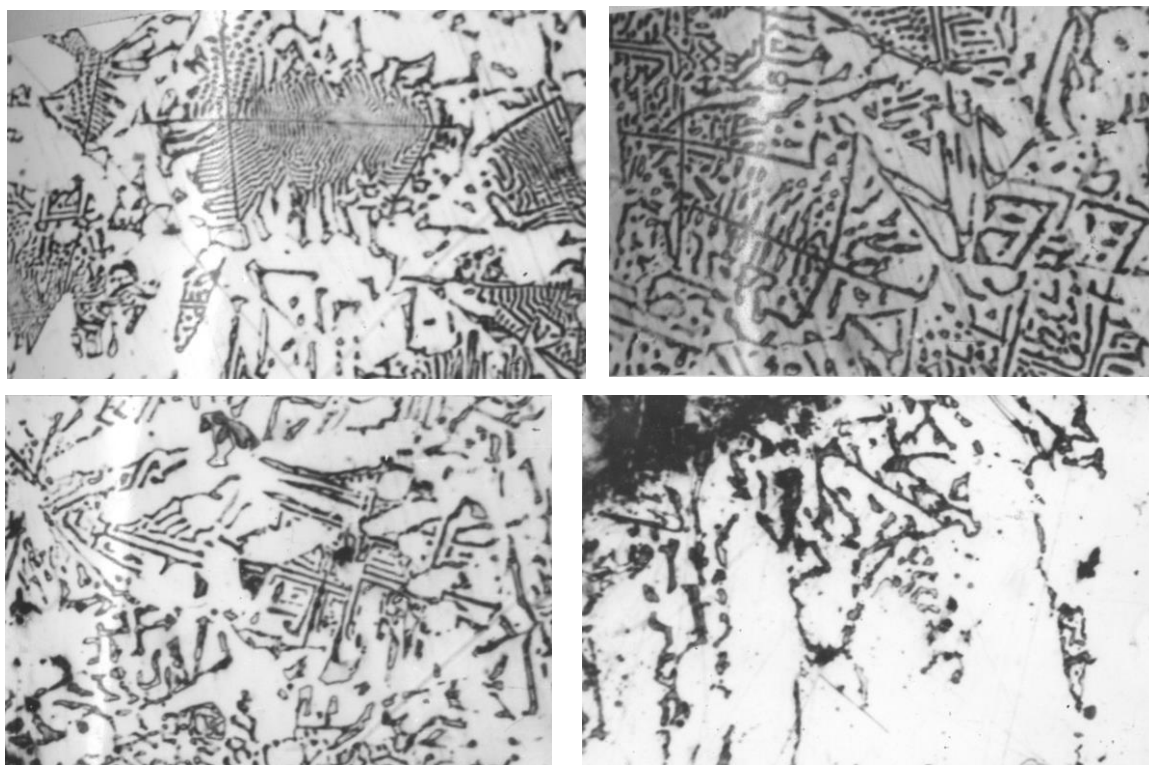


Рисунок 4 – Евтектоїдна мікроструктура металоматриці та перехідної зони армованих зразків.
450^x Травлення реактивом Муракамі

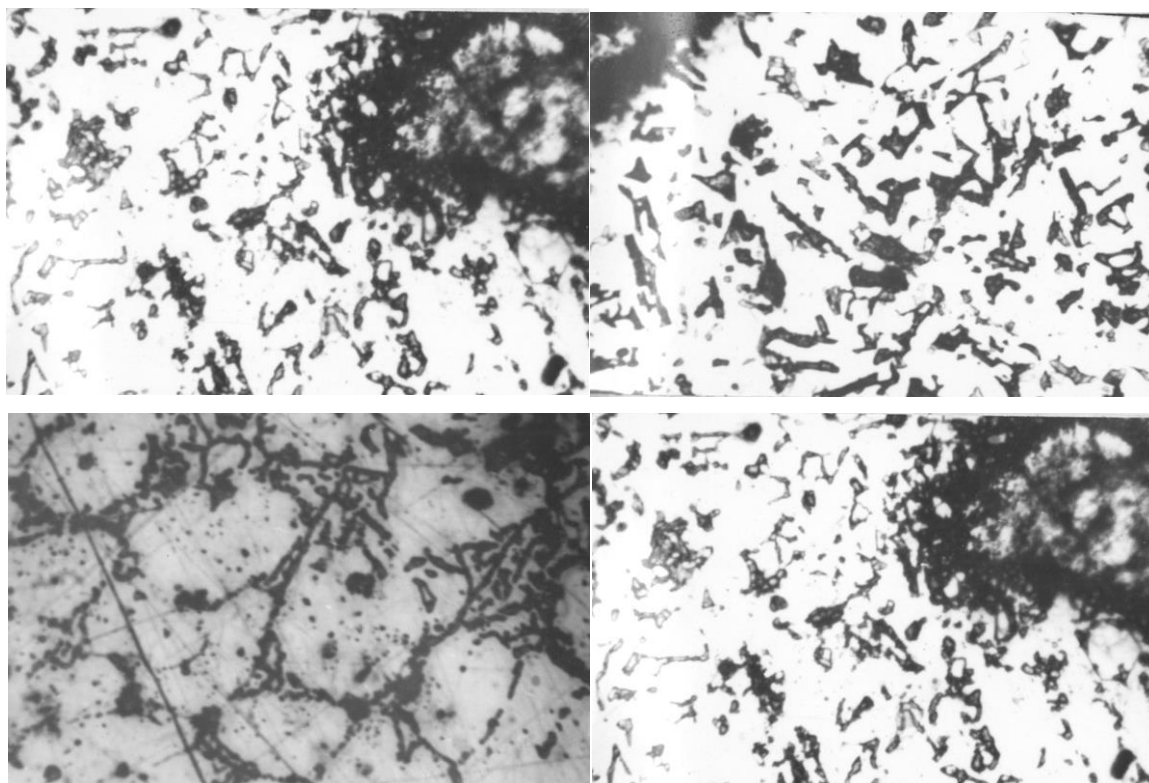


Рисунок 5 – Небажана мікроструктура металоматриці та перехідної зони армованих зразків.
450^x Травлення реактивом Муракамі.

твердого сплаву, які отримують навколо обвід ζ -фази шириною 10-20 мкм. Порожнини і тріщини зустрічаються набагато рідше.

Накладання вібрації дещо збільшує число вкраплень ζ -фази і майже всі зерна мають обвід з радіально орієнтованої до зерна WC ζ -фази. Дещо зростає ступінь легування основного металу вольфрамом. Останнє сприяє міцності утримання зерен у матриці. При цьому зернистість металу зменшується і щільність збільшується. Основний фазовий склад металозв'язки – пластинчаста ζ -фаза невеликих розмірів і багато евтектики $\alpha + \zeta$, що відповідає 3-5 балам шкали ВНДІБТ.

В значній мірі на структуру матриці впливають температура попереднього нагрівання, частота і амплітуда вібрації ливарної форми, а також грануляція твердого сплаву.

Нагрівання форми до 650°C і вище призводить до практично повного розчинення зерен та утворення надмірної кількості карбідів, вольфрамідів і порожнин, а внаслідок розпаду θ фази виділяється графіт.

Зростання частоти та амплітуди вібрації сприяє утворенню широкої (до 35 мкм) перехідної зони (облямування), що складається з ζ -фази.

Однорідність структури та її оптимальний фазовий склад мають місце при концентрації зерен (грануляцією 0,6–1,6 мм) від 45 до 65 %. Зниження концентрації супроводжується неоднорідністю структури (рис. 4).

Із зменшенням розміру зерен нижче 0,6 мм основний метал надміру насичується крупною ζ -фазою, а збільшення розміру понад 1,6 мм супроводжується зменшенням розчинності WC.

Випробування показали, що найбільш стійкими до абразивного та ударно-абразивного спрацювання є зразки з металозв'язкою, що містить багато рівномірно розподіленої ζ -фази і подвійної евтектики (4-5 бали шкали), а довкола зерен утворюється широкий обвід з некрупної ζ -фази.

Потовщення обвідка навколо зерен певною мірою сприяє зростанню абразивної стійкості, але ударно-абразивна стійкість значно знижується за рахунок крихкості обвідка.

Дослідження мікротвердості зразків

Середня мікротвердість оснащення є комплексним показником, що визначає його якість. Вплив твердої компоненти на середню мікротвердість визначається концентрацією та розмірами твердосплавних частинок, а вплив металозв'язки визначається мірою її додатко-

вого легування вольфрамом, нікелем, хромом, ванадієм і т.п., а також мікроструктурою. Вплив твердосплавної складової в основному стабільний і передбачуваний, а тому середня мікротвердість визначається структурою та хімічним складом металозв'язки.

Ми визначали мікротвердість армованої зони за методиками уколуювання і дряпання алмазною пірамідкою (за Віккерсом).

У межах даного дослідження науковий інтерес становлять як абсолютні значення мікротвердості, так і характер її зміни в зоні переходу від матриці (основного металу) до серцевини армувальних твердосплавних компонентів. Результати цих вимірювань представлено на рисунках 6 та 7. Так, числові значення мікротвердості металозв'язки становлять від 5,45 до 8,3 $\times 10^3$ Н/мм², зерна реліту (литого карбіду вольфраму) від 21,3 до 28,8 $\times 10^3$ Н/мм², а перехідної зони – в межах 12 – 20 $\times 10^3$ Н/мм².

Метод дряпання був реалізований на мікротвердомірі ПМТ-3, оснащеним спеціальним пристроєм лінійного переміщення столика із зразком.

Результати дряпання алмазною пірамідкою показані на рис. 7, а графічний запис зміни профілю виконаний профілографом-профілометром – на рис. 8, де верхня крива – подряпина зразка без навантаження, нижня – по тому ж сліду з навантаженням пірамідки 100 г.

Дослідження зразків на абразивну стійкість

Випробування зразків діаметром 10 мм, армованих релітом зернистістю 1,0 – 1,6 мм, на стійкість при роботі по твердому абразиву (круги керамічні з наповнювачем SiC зеленого, твердістю СТ2, навантаження 350-370 Н) засвідчили, що збільшення концентрації твердого сплаву з 35% до 65% зменшує питоме спрацювання армованої зони у 2,0–2,2 рази (рис. 9).

Висновки

Проведеними комплексним лабораторним дослідженнями отриманих композиційних матеріалів на макро-, мікроструктуру, мікротвердість окремих структурних складових об'ємно-армованої зони і абразивної стійкості зразків встановлено наступне.

Накладання відцентрових сил та низько-частотної вібрації при отриманні армованих виливків покращує заповнення зернистим твердим сплавом периферійних об'ємів зразків, підвищує концентрацію останнього у матриці.

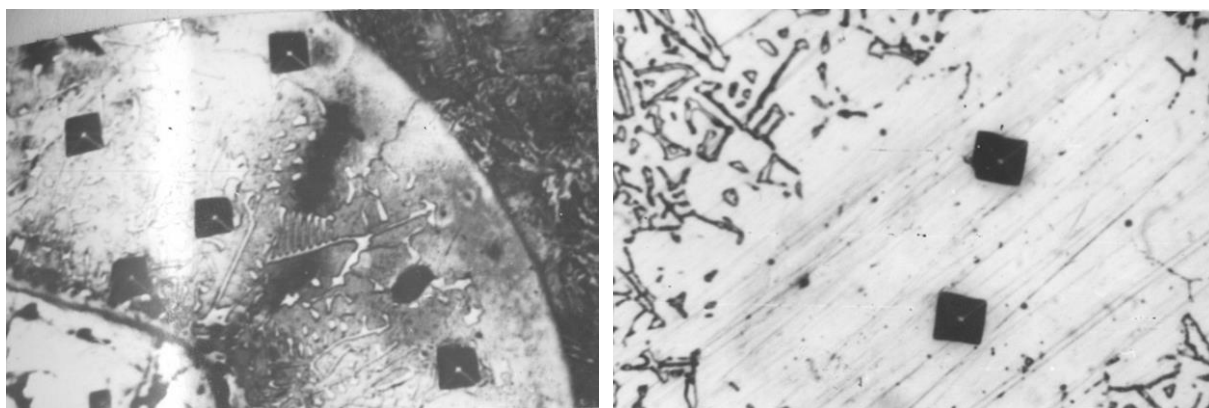


Рисунок 6 – Визначення мікротвердості металевої матриці та перехідної зони методом вдавлювання алмазної піраміди

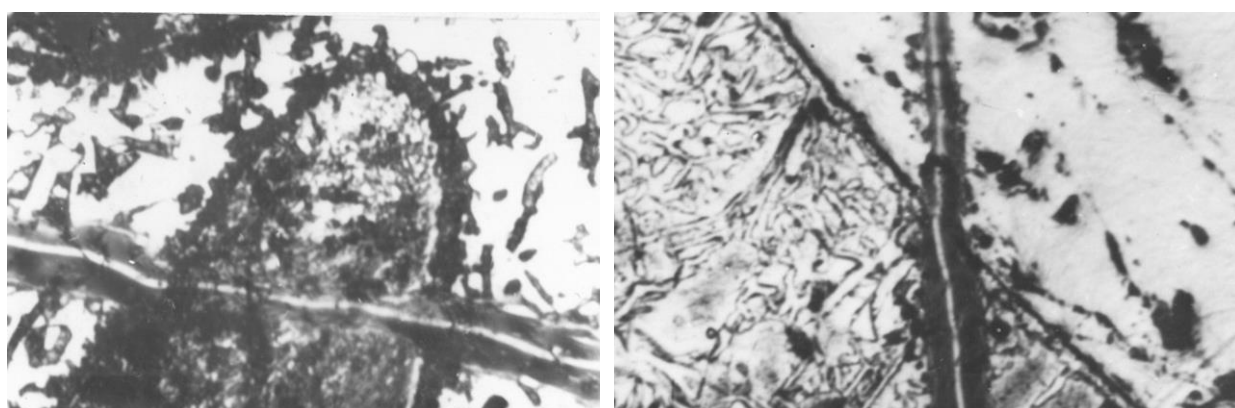


Рисунок 7 – Визначення зміни мікротвердості з переходом «металева матриця – перехідна зона – зерно» методом дряпання алмазною пірамідкою

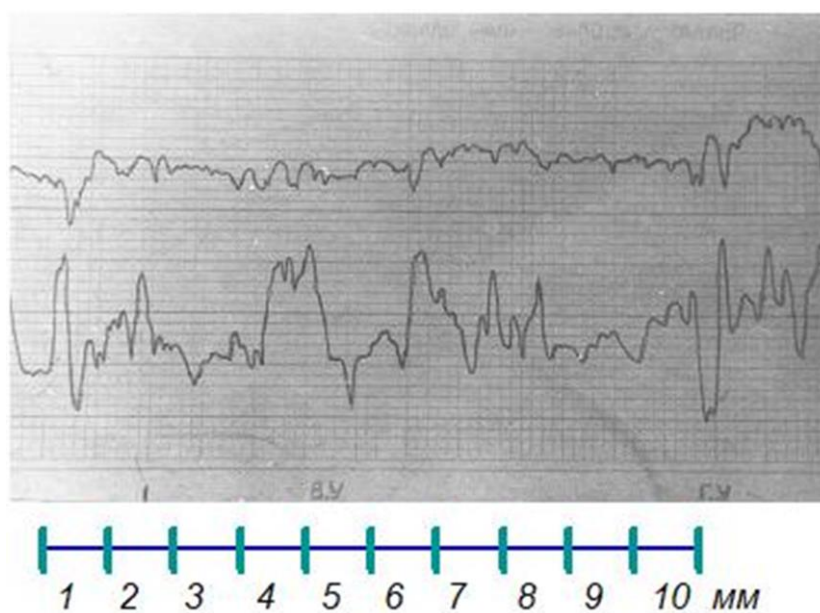
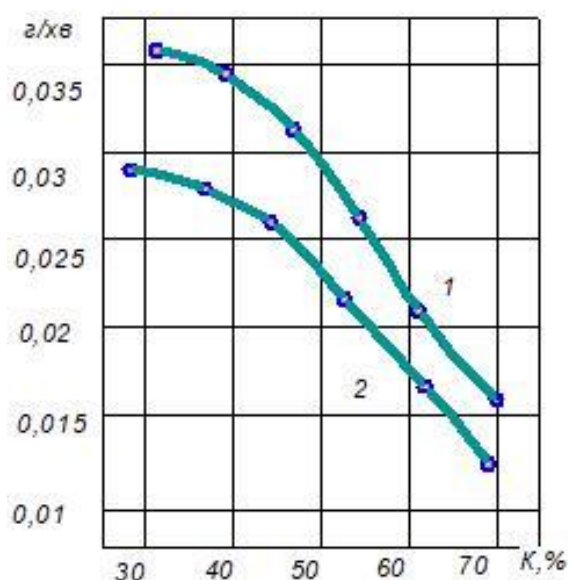


Рисунок 8 – Характер зміни мікротвердості по перерізу зразка, отриманий дряпанням алмазною пірамідкою



1 – відцентрово-армовані зразки,
2 – армовані з накладенням вібрації $f = 32$ Гц
Рисунок 9 – Вплив концентрації твердого сплаву в армованій зоні на стійкість до абразивного спрацювання

Металографічними дослідженнями ідентифіковано типи мікроструктур металевої матриці та перехідної зони, що формуються внаслідок розчинення матеріалу армувальних частинок.

Використання лабораторного комплексу на базі мікротвердоміра ПМТ-3, профілограф-профілометра та пристрою точного переміщення столика дало змогу отримати криві розподілу мікротвердості за структурними компонентами армованої зони.

Випробування на абразивну стійкість виявили характер впливу концентрації зерен армувальних компонентів на питоме абразивне зношування зразків.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Рейнталь О. О., Лихошва В. П., Тимошенко А. М., Клименко Л. М. Литі композиційні матеріали на основі мідних сплавів. *Метал та лиття України*. 2020. Т. 28, № 3 (322). С. 69–74. URL: <https://www.metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/122>
2. Мініцький А. В., Ямшинський М. М., Биба Є. Г., Мініцька Н. В., Поліщук К. В., Лук'яненко І. В., Кивгилло Б. В. Вплив умов спікання на структуроутворення композиційних матеріалів на основі вольфраму. *Метал та лиття України*. 2023. Т. 31, № 2 (333). С. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.062>
3. Небожак І. А., Дерев'янка О. В., Верховлюк А. М., Каніболоцький Д. С. Характер зв'язку армуючої фази з матрицею в литому композиційному матеріалі системи [Al – FeCr] та механізм процесу армування ливарних Al-сплавів за ЛГМ-процесом. *Метал та лиття України*. 2022. Т. 30, № 4 (331). С. 36–47. URL: <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/download/40/40>
4. Смірнова Я. О., Гурія І. М. Мікроструктура та механічні властивості шаруватого литого композиту ВТ-6/Al. *Метал та лиття України*. 2022. Т. 30, № 1 (328). С. 84–90. URL: <https://www.metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/10>
5. Кирилюк С. Ф., Кирилюк Є. С., Баглюк Г. А. Вплив гарячого штампування на структуру та властивості порошкових композитів системи Fe-ФХ800–TiB₂. *Наукові нотатки*. 2025. Вип. 81. С. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2025.81.9>
6. Pagounis E., Lindroos V. K. Processing and properties of particulate reinforced steel matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*. 1998. Vol. 246, Iss. 1. P. 221–234. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00710-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00710-7)
7. Yan X., Zheng Y., Qiu Y., Qiao G., Du W., He H., Bai Q. Role of reinforcement on the microstructure of WC reinforced Fe-based composite coating prepared by direct energy deposition. *Materials Characterization*. 2024. Vol. 209. Art. 113731. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113731>
8. Raja S., Melkani U., Sarma R., Kapil S., Muthu N. A method for realizing continuous tungsten fiber-reinforced steel matrix composites by wire-arc-based directed energy deposition. *Composite Structures*. 2025. Vol. 354. Art. 118811. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118811>

9. Ren C., Zhao N., Ma L., Shan R., Xu Y., Cui Z., Zhong L. Preparation and formation mechanism of (W) WC/Fe bundle reinforced iron matrix composites. *Ceramics International*. 2024. Vol. 50, Iss. 23, Part B. P. 51152–51161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.027>

10. Gao W., Zhou Y., Wu S., Cai R., Zhao Y., Li S., Huang Z. Preparation, microstructure and mechanical properties of steel matrix composites reinforced by a 3D network TiC ceramics. *Ceramics International*. 2022. Vol. 48, Iss. 14. P. 20848–20857. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.074>

References

1. Reintal, O. O., Lykhoshva, V. P., Tymoshenko, A. M., & Klymenko, L. M. (2020). Cast composite materials based on copper alloys. *Metal and Casting of Ukraine*, 28(3), 69–74. <https://www.metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/122> [in Ukrainian]

2. Minitskyi, A. V., Yamshynskyi, M. M., Byba, Ye. H., Minitska, N. V., Polishchuk, K. V., Lukianenko, I. V., & Kyvhylo, B. V. (2023). Influence of sintering conditions on the structure formation of tungsten-based composite materials. *Metal and Casting of Ukraine*, 31(2), 62–68. <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.062> [in Ukrainian]

3. Nebozhak, I. A., Derevianko, O. V., Verkhovliuk, A. M., & Kanibolotskyi, D. S. (2022). The nature of the connection between the reinforcing phase and the matrix in a cast composite material of the [Al – FeCr] system and the mechanism of the reinforcement process of cast Al-alloys by the LGM-process. *Metal and Casting of Ukraine*, 30(4), 36–47. <https://metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/download/40/40> [in Ukrainian]

4. Smirnova, Ya. O., & Huriia, I. M. (2022). Microstructure and mechanical properties of layered cast composite VT-6/Al. *Metal and Casting of Ukraine*, 30(1), 84–90. <https://www.metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/10> [in Ukrainian]

5. Kyryliuk, S. F., Kyryliuk, Ye. S., & Bahliuk, H. A. (2025). Influence of hot stamping on the structure and properties of powder composites of the Fe-FKh800–TiB2 system. *Scientific Notes*, (81), 62–69. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2025.81.9> [in Ukrainian]

6. Pagounis, E., & Lindroos, V. K. (1998). Processing and properties of particulate reinforced steel matrix composites. *Materials Science and Engineering: A*, 246(1), 221–234. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00710-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00710-7)

7. Yan, X., Zheng, Y., Qiu, Y., Qiao, G., Du, W., He, H., & Bai, Q. (2024). Role of reinforcement on the microstructure of WC reinforced Fe-based composite coating prepared by direct energy deposition. *Materials Characterization*, 209, 113731. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113731>

8. Raja, S., Melkani, U., Sarma, R., Kapil, S., & Muthu, N. (2025). A method for realizing continuous tungsten fiber-reinforced steel matrix composites by wire-arc-based directed energy deposition. *Composite Structures*, 354, 118811. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118811>

9. Ren, C., Zhao, N., Ma, L., Shan, R., Xu, Y., Cui, Z., & Zhong, L. (2024). Preparation and formation mechanism of (W) WC/Fe bundle reinforced iron matrix composites. *Ceramics International*, 50(23), 51152–51161. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.10.027>

10. Gao, W., Zhou, Y., Wu, S., Cai, R., Zhao, Y., Li, S., & Huang, Z. (2022). Preparation, microstructure and mechanical properties of steel matrix composites reinforced by a 3D network TiC ceramics. *Ceramics International*, 48(14), 20848–20857. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.074>

COMPREHENSIVE STUDIES OF THE REINFORCED ZONE PROPERTIES OF COMPOSITE DRILLING TOOL EQUIPMENT

Borushchak L. O.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-4090-0279>
e-mail: liubomyr.borushchak@nung.edu.ua

Romaniv M. R.

Master
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Karpatska Str., 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0001-1784-7342>
e-mail: mykola.romaniv-pmkm251@nung.edu.ua

Abstract. The article analyzes modern technologies for producing composite materials based on powder metallurgy, infiltration, and casting methods. The matrix of such composites is aluminum and copper alloys, while the filler consists of powder materials based on carbides of refractory metals. The unsuitability of such materials for operation under high static and dynamic loads in the presence of an abrasive environment is substantiated. The essence of the technology for producing wear-resistant bulk-reinforced equipment for drilling tools and the main requirements for their performance are briefly described. The results of comprehensive studies of macro- and microstructure, microhardness, and wear resistance are considered in the context of ensuring the operational characteristics of the reinforced zone of composite equipment for rock-destroying and emergency drilling tools. The distribution pattern of hard alloy grains within the volume of the reinforced zone has been determined. The main defects of reinforced castings have been identified, namely blowholes and cavities resulting from gas release and non-uniform crystallization of the base metal in the casting. Through the preparation of microsections, their etching, and examination using metallographic equipment, the microstructures of the metal binder of the reinforced zone were identified. The microhardness of the metal binder, the transition zone, and the reinforcing components was determined using indentation and scratching methods. It is noted that the abrasive and impact-abrasive resistance of the tool is significantly influenced by the percentage content of reinforcing grains, their distribution and concentration within the reinforced zone, as well as the degree of dissolution of reinforcing components in the metal binder, primarily tungsten, titanium, nickel, and cobalt. As a result, a transition zone forms around the hard alloy grains, ensuring the strength and toughness of their retention in the base metal. The test results of reinforced samples for resistance to abrasive wear reveal the influence of the concentration of reinforcing grains on their durability.

Keywords: drilling tool equipment, bulk-reinforced zone, granular hard alloy, metal binder, macrostructure, microstructure, eutectic, carbides, microhardness, impact-abrasive resistance.